

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Simulació del contrarentat de filtres de sorra amb dinàmica de fluids computacional

**Document:** Memòria i annexos

**Alumne:** Rubén Gay Alaminos

**Tutor:** Toni Pujol Sagaró

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Mecànica de Fluids

**Convocatòria (mes/any):** Juny 2020

## ÍNDEX

## MEMÒRIA

1.	INTRODUCCIÓ .....	3
1.1	Antecedents.....	3
1.2	Objecte .....	4
1.3	Especificacions i abast.....	4
1.3.1.	Especificacions.....	4
1.3.2.	Abast .....	4
2.	METODOLOGIA.....	5
3.	DESCRIPCIÓ DEL MODEL.....	8
3.1.	Model 2D .....	8
3.1.1.	Geometria i mallat .....	8
3.1.2.	Materials .....	10
3.1.3.	Model Fluent .....	10
3.2.	Adaptació del model 2D al 3D.....	13
4	SIMULACIÓ FILTRE 2D .....	14
4.1.	Introducció.....	14
4.2.	Comparació amb dades experimentals publicades .....	16
4.3.	Efecte de la malla .....	19
4.4.	Sensibilitat del model.....	21
4.5.	Resultats configuració REV60550WY_2V.....	24
5	SIMULACIÓ FILTRE 3D .....	27
5.1.	Geometria i mallat 3D .....	27
5.2.	Models i resultats de les simulacions .....	29
5.2.1.	Simulació 3DPDE_2V.....	29
5.2.2.	Simulació 3DPP_3VLLARG.....	30
5.2.3.	Simulació 3DPP_3V .....	32
5.2.4.	Simulació 3DPP_3VU0.....	33
5.2.5.	Simulació 3DPP_2VMG.....	34

6	CONCLUSIONS .....	39
7	RELACIÓ DE DOCUMENTS .....	41
8	BIBLIOGRAFIA.....	42
ANNEXOS		
	ANNEX A: GENERACIÓ DE LA MALLA .....	43
	A.1. Mallat simulacions en dues dimensions .....	44
	A.2. Mallat simulacions en tres dimensions .....	47
	A.3. Qualitat de la malla 3D .....	53
	ANNEX B: CONFIGURACIÓ DEL MODEL .....	55
	B.1. Introducció .....	56
	B.2. Model dues dimensions .....	56
	B.3. Model tres dimensions .....	58
	B.4. Equacions del model .....	60

## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1 Antecedents

Els filtres de sorra necessiten periòdicament una neteja per eliminar la brutícia acumulada i que el fluid pugui circular adequadament. Si no es realitzés aquesta operació, el fluid patiria una pèrdua de pressió elevada o inclús es podria obstruir el filtre. Per eliminar la brutícia dels filtres de sorra es realitza el procés de contrarentat.

El contrarentat consisteix a fer circular el fluid en sentit contrari a l'habitual. La sorra, compactada en el fons del filtre, s'expandeix i s'eleva pel filtre, deixant que la brutícia que hi havia a la sorra marxi amb el fluid. És important controlar la velocitat i pressió de l'aigua que s'aplica en el contrarentat per evitar que la sorra s'elevi massa i pugui arribar a sortir del filtre.

Aquesta pràctica és molt habitual en els sistemes de reg per degoteig. Aquest tipus d'agricultura consisteix a col·locar un sistema de petits tubs per tota la zona agrícola, els quals tenen uns petits forats per on surt l'aigua gota a gota. Aquest sistema s'utilitza freqüentment, fins a cinc o sis cops per dia, amb un cabal petit i a baixa pressió. Per al correcte funcionament del sistema, és important que l'aigua contingui el menor nombre d'impureses per tal d'evitar l'obstrucció de les sortides dels tubs. Per això, es realitza un rentat del filtre periòdicament i de forma automàtica, el qual comporta un gran consum d'energia. Una de les grans avantatges d'aquest sistema de reg és l'aprofitament de l'aigua, ja que només es reguen zones concretes, a diferència del reg per inundació que podíem trobar en els camps d'arròs.

Per poder reduir el consum elèctric que comporta el procés de contrarentat, s'ha de conèixer bé el comportament del llit fluïditzat, que en aquest cas és la sorra. No s'han realitzat anteriorment estudis de filtres de sorra per a reg, però sí que hi ha coneixement d'estudis on s'ha simulat casos similars on interaccionava aigua amb altres sòlids granulars. Com cada sòlid té un comportament i característiques diferents, és important definir una metodologia que sigui capaç d'adaptar-se als diferents filtres de sorra que es troben en el mercat.

Aquest coneixement pot comportar que els fabricants puguin dir amb més exactitud el cabal necessari per a la correcta neteja del filtre, reduint així el consum d'energia utilitzada.

## 1.2 Objecte

Simular el contrarentat de filtres de sorra per a reg per degoteig amb dinàmica de fluids computacional.

## 1.3 Especificacions i abast

### 1.3.1. Especificacions

Tema	O/D	Descripció
Mallat	O	-Realitzar les simulacions amb un mallat que compleixi les condicions mínimes de qualitat (en referència al Skewness, Orthogonal Quality i Aspect Ratio).
Simulació	O O	-Comparar diferents models de simulació i definir quin és el més adient per aquests tipus de simulacions. -Realitzar les simulacions per a un període de temps real superior als 30 segons.
Resultats	O	-Comparar els resultats obtinguts amb dades experimentals per verificar l'exactitud de les simulacions.

### 1.3.2. Abast

Es definirà la metodologia més adient per simular amb dinàmica de fluids computacional el contrarentat en filtres de sorra per a reg fent una cerca bibliogràfica sobre llits fluïditzats líquid-sòlid. Es validarà la metodologia amb casos publicats de llits fluïditzats. S'aplicarà la metodologia en un filtre de sorra comercial per extreure'n conclusions.

## 2. METODOLOGIA

Per a la realització de les simulacions s'ha utilitzat el programa Fluent d'ANSYS, en la versió 2019R1. Aquest programa està dissenyat per tractar fluids, ja sigui aigua, aire, o qualsevol fluid que un vulgui, i com interacciona amb certs volums. En aquest cas, es tracta com interacciona un fluid amb un sòlid, l'aigua amb la sorra.

Com a punt de partida per aquest treball, s'ha partit d'un article realitzat prèviament en relació amb els llits fluïditzats. Aquest article es titula "CFD modelling of a liquid-solid fluidized bed" (Cornelissen et al., 2007). Aquest estudi només tracta casos en dues dimensions (2D), a diferència d'aquest treball, l'objecte del qual és poder implementar aquesta metodologia en un cas en tres dimensions (3D). L'article de Cornelissen et al. (2007) també explica en molt detall quin model han utilitzat i quines alternatives es poden utilitzar. L'article inclou les dades experimentals dels assajos realitzats. El capítol 3 descriu els models aquí utilitzats.

El capítol 4 d'aquest treball és simular diferents casos amb diverses alternatives del model utilitzat i comparar posteriorment l'efecte d'aquests. També es compararan amb els resultats experimentals de l'article mencionat anteriorment. Com a punt de partida s'ha utilitzat el model descrit en l'article de Cornelissen et al. (2007), adaptant-lo a les noves versions del programa. En la figura 1 es pot observar la representació d'una simulació de llit fluïditzat sòlid-líquid al llarg del temps i com es comporta. Inicialment, la sorra es troba compactada al fons del domini (color vermell a la figura 1), amb un valor de la fracció en volum de 0,65 (en aquella regió el 65% del volum està ocupat per sorra i el 35% per aigua). En aquest moment s'injecta aigua de forma constant per la part inferior que, al cap del temps, va aixecant la sorra reduint-ne la fracció en volum al mateix temps que augmenta l'altura del llit. Arriba un moment en què, per molt que avanci el temps, el llit fluïditzat no augmenta l'alçada i la fracció en volum del llit es manté constant i gairebé uniforme en tota la regió.

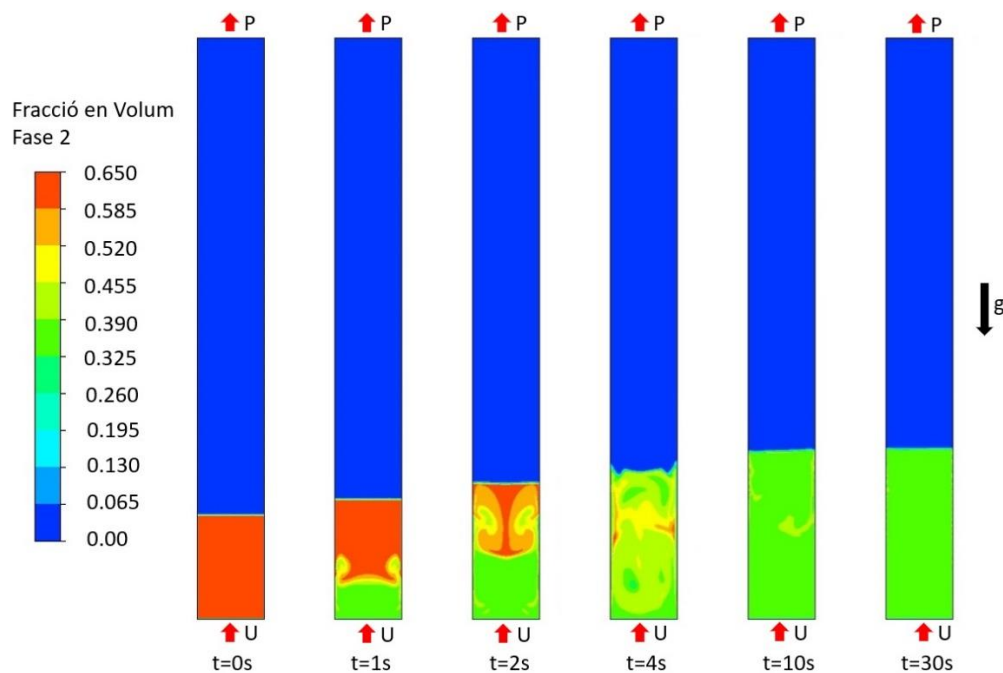


Figura 1 - Representació de la fracció en volum de la sorra en el temps de la simulació SEC60550WY\_FV06 per a una velocitat d'entrada  $U=0,0381\text{m/s}$ .

Posteriorment s'ha adaptat el model utilitzat en el 2D a un filtre en 3D. En el capítol 3 es comentarà com s'ha adaptat el model, quins canvis s'han realitzat i quins problemes s'han trobat. Els resultats d'aquests casos s'exposen al capítol 5.

En la taula 1 es pot observar un llistat amb les simulacions en dues dimensions que s'han realitzat i una petita descripció d'aquestes. En posteriors capítols s'explicaran amb més detall.

### CASOS EN DUES DIMENSIONS (2D)

Nom	Descripció
SEC60550WY_FV06	Secció del filtre amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. S'ha assignat una fracció en volum inicial de la sorra de 0,6. Simulació de referència.
SEC60550WY	Secció del filtre amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu.
REV60550WY	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu.
REV50400WY	Geometria de revolució amb una malla de 50x400 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu.
REV40250WY	Geometria de revolució amb una malla de 40x250 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu.
REV60550HG	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Huilin-Gidaspow.
REV60550WY_0001	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. S'ha disminuït el pas de temps a 0,0001 segons.

REV60550W_RE104	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. S'ha reduït el criteri de convergència a $10^{-4}$ .
REV60550WY_PP	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. S'ha canviat el model de temperatura granular a Phase Property.
REV60550WY_PL06	Geometria de revolució amb una malla de 60x550 seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. El límit de compactació de la sorra s'ha variat a 0,6.
REV60550WY_2V	Geometria de revolució seguint el model d'arrossegament de Wen-Yu. S'ha modificat la geometria com a pas previ per adaptar aquest model a les simulacions en tres dimensions. S'ha afegit un volum previ on només pot accedir l'aigua, simulant l'espai previ a la reixa d'un filtre.

Taula 1 - Llistat i descripció de les simulacions en dues dimensions realitzades.

Per acabar el treball es volia comparar els resultats obtinguts a les simulacions amb els obtinguts a partir d'un experiment propi. Degut a les circumstàncies que s'han donat a partir del març del 2020 i de l'efecte del COVID-19, no s'ha pogut realitzar aquest experiment. Conseqüentment, aquest treball acaba donant un proposta de simulació, veient el comportament de les simulacions en 2D i 3D.

En la taula 2 es pot veure el llistat de les simulacions en tres dimensions, tal com s'ha fet anteriorment amb les simulacions en dues dimensions.

### CASOS EN TRES DIMENSIONS (3D)

Nom	Descripció
3DPDE_2V	Filtre en tres dimensions que segueix el model de temperatura granular de Partial Differential Equation. La geometria està dividida en dos volums i no incorpora el volum previ d'aigua. Sense reixa.
3DPP_3VLLARG	Filtre en tres dimensions que segueix el model de temperatura granular de Phase Property. La geometria està dividida en tres volums i sí incorpora el volum previ d'aigua. S'ha augmentat l'alçada del filtre. Sense reixa.
3DPP_3V	Filtre en tres dimensions que segueix el model de temperatura granular de Phase Property. La geometria està dividida en tres volums i sí incorpora el volum previ d'aigua. Sense reixa.
3DPP_3VU0	Filtre en tres dimensions que segueix el model de temperatura granular de Phase Property. La geometria està dividida en tres volums i sí incorpora el volum previ d'aigua. Sense reixa. S'ha limitat l'accés de la sorra en el volum d'aigua mencionat.
3DPP_2VMG	Filtre en tres dimensions que segueix el model de temperatura granular de Phase Property. La geometria està dividida en dos volums i no incorpora el volum previ d'aigua. Amb reixa i una malla amb més elements.

Taula 2 - Llistat i descripció de les simulacions en tres dimensions realitzades.



### 3. DESCRIPCIÓ DEL MODEL

A l'hora de realitzar una simulació és important definir bé el model utilitzat perquè sigui possible reproduir-lo. En aquest apartat es mencionaran els termes que s'han tingut en compte per realitzar les simulacions.

#### 3.1. Model 2D

##### 3.1.1. Geometria i mallat

El filtre utilitzat té unes dimensions de 1100 mm de longitud i 127 mm de diàmetre. Per simplificar les simulacions s'ha agafat només la secció longitudinal del filtre, resultant una làmina en dues dimensions. En gran part de les simulacions s'ha tractat la geometria com a cos de revolució i, per tant, l'amplada d'aquest a passat de ser el diàmetre del filtre a ser el radi, en concret 63,5 mm. Per a poder tractar una geometria com a cos de revolució dins del programari Fluent, l'eix de revolució d'aquesta s'ha de trobar sobre l'eix X. En la figura 2 es pot veure les dues geometries utilitzades i les seves parts.

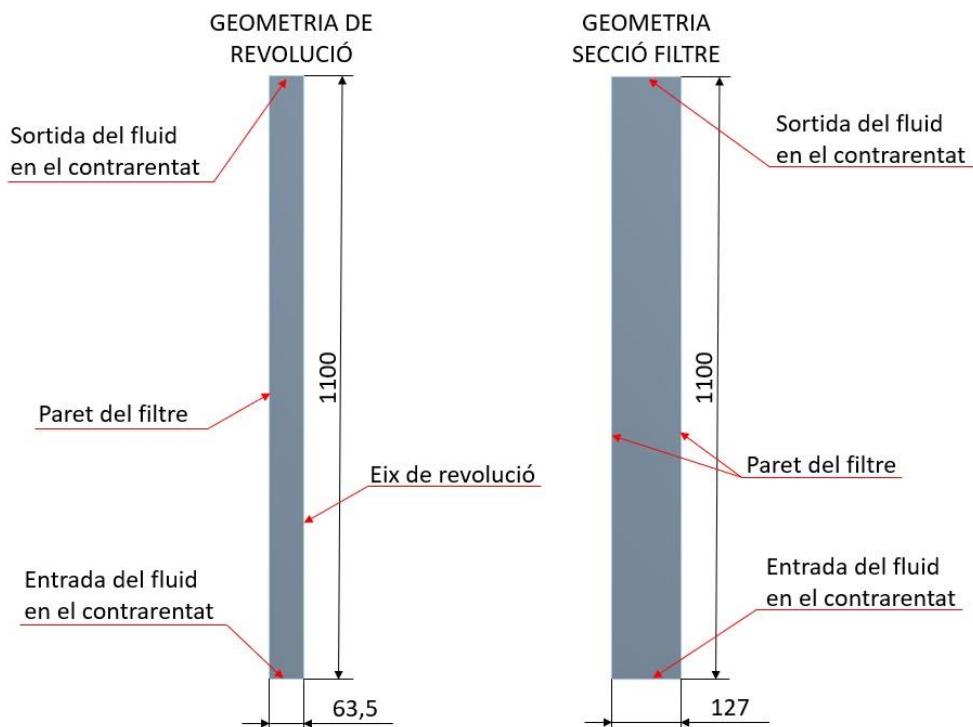


Figura 2 - Descripció dels dos tipus de geometries utilitzades en les simulacions i de les seves parts (Unitats en mm).

El mallat utilitzat per a aquesta geometria utilitza elements quadrilàters i, per tant, és en forma de graella. Per obtenir-lo es defineixen el nombre de separacions en l'amplada del filtre i en l'alçada d'aquest. Per defecte s'ha partit d'una malla de 60X550 divisions (ample per alçada).

En els casos on la geometria representa un cos de revolució, les separacions en l'eix que representa l'amplada del filtre s'han reduït en la meitat, quedant així una malla de 30X550 divisions, tal com mostra la figura 3. El mallat per a la geometria de revolució consta de 16500 elements i, per a la secció del filtre consta de 33000, el doble.

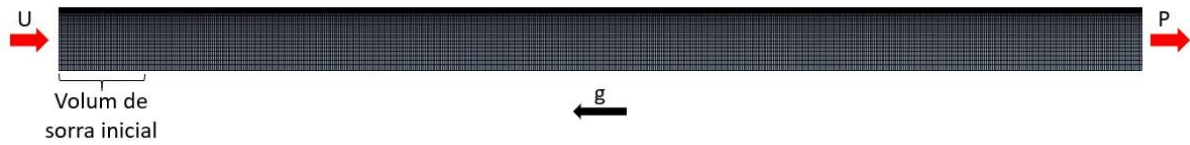


Figura 3 – Geometria de revolució amb un mallat de 60x550 divisions.

Com s'ha volgut estudiar l'efecte que té la dimensió del mallat, s'han creat malles de 40X250 divisions i 50X400 divisions, i els seus mallats respectius per a les geometries de revolució, seguint el procediment explicat anteriorment.

S'ha afegit un biaix en el mallat, el qual fa que les separacions del mallat no siguin uniformes, sinó que unes siguin més estretes que altres. Aquest biaix s'ha aplicat en les zones on el fluid entra en contacte amb la paret del filtre, ja que és on el comportament del fluid es veu més afectat. El factor de biaix és de 10, això vol dir que les separacions en la zona de contacte amb la paret seran 10 vegades més petites que les que es troben al centre de revolució del filtre i així podran capturar millor la informació en aquesta zona on s'espera un gradient important de la velocitat. Aplicant aquest biaix, els elements més petits tenen una mida de 2x0,53mm i els més grans tenen una mida de 2x5,3mm. En la figura 4 es pot observar amb més detall el biaix en una malla de 60x550 divisions.

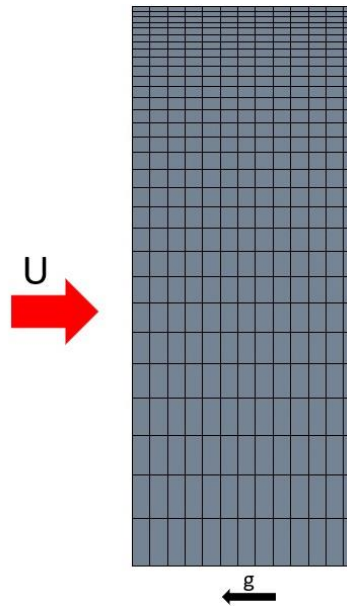


Figura 4 - Detall del biaix de la malla 60x550.

### 3.1.2. Materials

En les simulacions interactua un fluid amb un sòlid, en aquest cas aigua amb sorra. L'aigua s'ha definit com a fluid i la sorra també, però aquest últim com a fluid granular. Això permet definir un volum el qual el programa el tractarà com a petites partícules amb la densitat i diàmetre que s'ha definit. Les propietats tant de l'aigua com de la sorra es poden consultar en l'annex B.

El volum inicial de sorra parteix amb una alçada de 198 mm amb un límit de compactació del 65%. Això vol dir que en un estat inicial, amb la sorra totalment compactada, en el volum que ocupa un 65% serà de sorra i el 35% restant serà aigua (que equival a la porositat de la sorra). Aquest tipus de sòlids granulars no arriben mai a un percentatge de compactació elevat, ja que sempre queda un espai entre grans important.

### 3.1.3. Model Fluent

Per a les simulacions s'ha seguit un model eulerià, transitori i resolt amb doble precisió on intervenen dues fases. La primera fase és el fluid, en aquest cas aigua, i la segona fase és el sòlid, en aquest cas la sorra. Dins d'aquest model s'han definit les propietats físiques de les dues fases, com són la densitat o la viscositat, les quals són les mateixes per a totes les simulacions. Algunes d'aquestes propietats es regeixen per equacions, com podrien ser la viscositat granular o la conductivitat granular.

En el cas del Fluent, et permet utilitzar les equacions més utilitzades en dinàmica de fluids computacionals sense haver d'entrar-les. En cada apartat l'opció d'utilitzar un model d'equacions específic per a cada cas, no definir cap valor, afegir un valor constant o definir l'equació pel mateix usuari. En l'annex B es pot veure quines equacions s'han utilitzat, les fórmules d'aquestes i el perquè s'ha utilitzat.

També s'han definit les propietats d'interacció de les dues fases. En aquest apartat s'ha volgut comprovar la influència de l'arrossegament (Drag en anglès). En totes les simulacions s'ha definit que l'arrossegament segueixi les equacions de Wen-Yu, a excepció d'un cas on s'ha canviat per la de Huilin-Gidaspow. La diferència entre aquests dos models es pot veure amb més detall en l'apartat B.4.6.Drag de l'annex B.

Per a les simulacions s'ha utilitzat una formulació transitòria amb un pas de temps fix de 0,001s. El programa calcularà en quina posició i quina velocitat tindrà cada gra de sorra cada 0,001 segons.

S'ha agafat un criteri de convergència general de  $10^{-3}$  per defecte. El criteri de convergència determina quan es pot passar al següent pas de temps. Per cada pas de temps es fan com a màxim 100 iteracions en el nostre cas. Si encara no ha arribat al nombre màxim d'iteracions, però els residuals són inferiors a  $10^{-3}$ , es donarà el càlcul per correcte i es passarà al següent pas de temps. Aquests dos aspectes comentats anteriorment són importants per a una simulació i inicialment s'han agafat els valors estàndards per a aquest tipus de simulacions. Per això s'ha volgut estudiar si varien molt els resultats quan els anteriors valors canvien. S'han realitzat dos models més, per veure els efectes d'utilitzar un pas de temps de 0,0001 segons o un criteri de convergència de  $10^{-4}$ .

Per últim, s'ha modificat el model de temperatura granular. En totes les simulacions s'ha utilitzat el model de Partial differential equation. Aquest model et permet configurar la conductivitat granular, la qual s'ha escollit el model de Syamlal-Obrien. Per veure l'efecte en canviar el model de temperatura granular, la configuració REV60550WY\_PP ha assignat el model de Phase Property, el qual permet configurar la temperatura granular aquí escollida que segueixi un model Algebraic. En l'annex B es pot trobar més informació sobre aquests dos models.

A continuació, a la taula 3 es poden veure les característiques de les vuit configuracions que s'han realitzat pel cas 2D i les diferències entre elles. Cal dir que cada configuració s'ha simulat amb diferents velocitats d'entrada de l'aigua.

Simulació	Geometria	Mallat	Drag	Criteri de convergència	Pas de temps	MTG*
REV60550WY	Cos de revolució	60x550	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,001s	PDE**
REV50400WY	Cos de revolució	50x400	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,001s	PDE**
REV40250WY	Cos de revolució	40x250	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,001s	PDE**
SEC60550WY	Secció del filtre	60x550	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,001s	PDE**
REV60550HG	Cos de revolució	60x550	Huilin-Gidaspow	$10^{-3}$	0,001s	PDE**
REV60550WY_0001	Cos de revolució	60x550	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,0001s	PDE**
REV60550W_RE104	Cos de revolució	60x550	Wen-Yu	$10^{-4}$	0,001s	PDE**
REV60550WY_PP	Cos de revolució	60x550	Wen-Yu	$10^{-3}$	0,001s	PP***

Taula 3 - Descripció de les configuracions dels models en dues dimensions.

\*MGT:Model de temperatura granular. \*\*PDE: Partial differential equation. \*\*\*:PP: Phase property

A part de les configuracions esmentades anteriorment, les quals cada una té una variació respecte a l'equació de referència, REV60550WY, s'ha creat una configuració més. La configuració REV60550WY\_PL06 consta d'un límit de compactació de 0,6 i un volum inicial de sorra de 0,6, representant les condicions de l'assaig experimental. Els resultats de simular diferents velocitats amb aquesta configuració es compararan amb dades d'assaig experimental i amb la configuració REV60550WY, per veure, al comparar-la amb aquesta última, com afecta la variació del límit de compactació. També es vol observar com tracta el programa quan s'aplica una fracció en volum de sorra inicial superior al límit de compactació, si limita la quantitat de sorra o executa la simulació tot i no complir amb el límit de compactació. En la taula 4 es pot observar les diferències d'aquesta nova configuració respecte a la configuració REV60550WY.

Simulació	Límit de compactació	Fracció en volum de sorra inicial
REV60550WY_PL06	0,60	0,60
REV60550WY	0,65	1

Taula 4 - Descripció i diferències de la configuració del model REV60550WY\_06 respecte a la configuració del model REV60550WY.

### 3.2. Adaptació del model 2D al 3D

A diferència de les configuracions explicades en l'apartat 3.1. Model 2D, en el filtre utilitzat en el model 3D, la reixa que subjectaria la sorra i evitaria que marxés del filtre es troba a una certa altura respecte a la base del filtre. En les simulacions 2D no s'ha afegit aquesta part i, per confirmar que si s'afegeix no afecta els resultats, s'ha creat un model idèntic al de la configuració REV60550WY, però afegint un espai a la base del filtre, com es mostra a la figura 5.

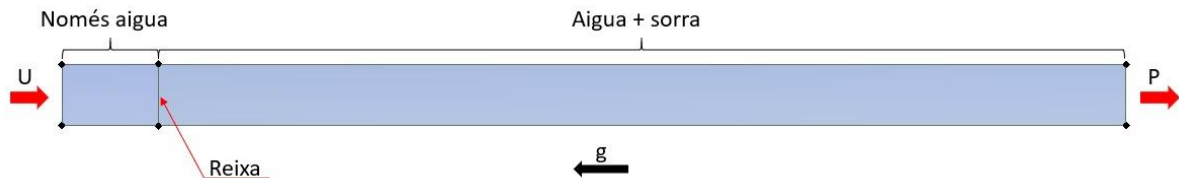


Figura 5 – Geometria del filtre en dues dimensions adaptada amb dos volums.

Aquest espai fa 100 mm d'alçada i s'ha configurat com una superfície diferent, permetent així poder definir que la velocitat de la fase 2, la sorra, tingui un valor de 0. Aquest procediment fa que la sorra no arribi a entrar mai en aquesta regió del filtre, simulant una reixa que no la deixa passar.

Un dels problemes que s'ha trobat en aquest tipus de simulació és que, si la regió on es defineix la sorra es troba en contacte amb la línia on hi ha el canvi de superfícies, aquesta entra en conflicte i la sorra baixa a la zona on no hauria d'estar permès, fent així que la simulació s'aturi.

Per resoldre aquest problema s'ha desplaçat la definició del volum inicial de sorra 1 mm cap amunt del real per deixar un petit marge només amb aigua en aquella zona d'intercanvi d'informació entre superfícies.

Una altra solució per aquest problema és simular durant un petit instant de temps, unes 100 iteracions, sense la sorra i posteriorment afegir-la en la regió original, com si s'iniciés la simulació. Això permet que es creï un flux d'aigua i, en assignar la sorra, aquesta ja no entraria en conflicte amb el flux d'aigua.

S'ha observat que al realitzar qualsevol dels dos procediments esmentats anteriorment, els resultats finals estacionaris no varien.

## 4 SIMULACIÓ FILTRE 2D

### 4.1. Introducció

Abans de comparar els resultats obtinguts de les simulacions amb els resultats experimentals obtinguts de l'estudi comentat en el capítol 2. Metodologia, s'han volgut comparar les simulacions entre elles per veure com varien els resultats i en quin percentatge.

Els valors obtinguts al realitzar les simulacions (els resultats) representen la fracció en volum de la sorra en el filtre, és a dir, la fracció de sorra que hi ha en un determinat volum, superfície o línia del domini, la qual s'expressa en tant per u. Com més gran és aquest valor, més compactada està la sorra. Per calcular la fracció en volum en tot el filtre, primer s'ha calculat la fracció en volum de la sorra cada 2 centímetres, representat en la figura 6 per les línies de color groc.

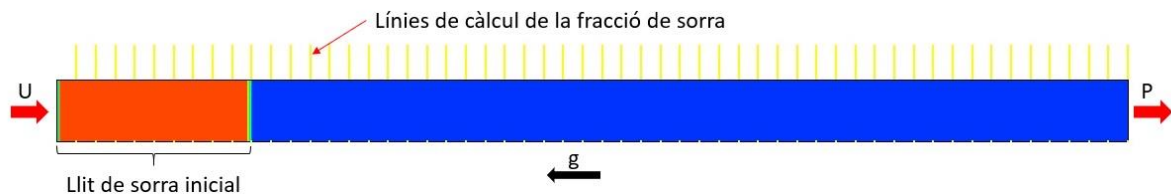


Figura 6 - Punts de càlcul de la fracció en volum de la sorra.

Posteriorment s'ha realitzat la mitjana entre les línies on ha arribat la sorra. Aquest criteri s'ha escollit a partir d'ignorar aquelles línies on la fracció en volum de sorra té un valor inferior a 0,1%. Els resultats s'han agafat en aquelles simulacions a partir de les quals el sistema està estable. És a dir, un cop la sorra es manté constant a la mateixa altura. Aquest punt s'ha agafat als 30 segons de simulació del flux real, que és on la majoria de les simulacions ja s'han estabilitzat, tal com es pot observar a la figura 7.

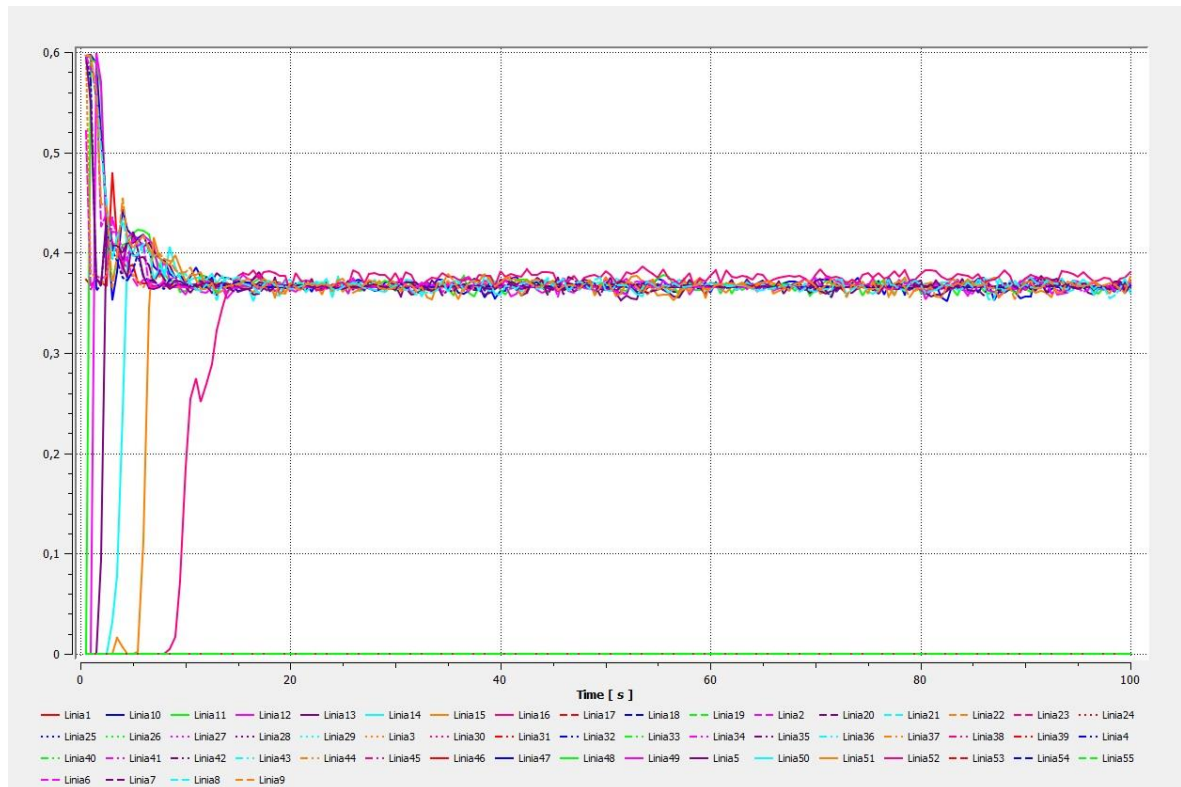


Figura 7 - Gràfic dels resultats en fracció en volum de la sorra de la simulació REV60550WY per a una velocitat  $U=0,0381\text{m/s}$ . Cada corba representa el valor mig de la fracció en volum al llarg d'una línia a altura constant (veure les línies grogues a la Figura 6).

Finalment s'ha realitzat la inversa, 1 menys fracció en volum de sorra, per obtenir la fracció en volum de l'aigua, per així poder comparar els resultats de les simulacions amb els resultats de l'assaig experimental. Els resultats de l'assaig experimental s'han extret de l'article de Cornelissen et al. (2007). S'han agafat els resultats per a les següents velocitats, les quals es poden veure en la taula 5.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en volum d'aigua (tant per u)
0,0126	0,489
0,0249	0,589
0,0381	0,660
0,0506	0,723
0,0632	0,778
0,0762	0,816
0,0889	0,852
0,1	0,885

Taula 5 - Resultats de l'assaig experimental de l'article Cornelissen et al. (2007).



#### 4.2. Comparació amb dades experimentals publicades

S'ha comparat els resultats de l'assaig experimental de l'article Cornelissen et al. (2007) amb la simulació REV60550WY\_PL06. En la taula 6 es pot observar la fracció en volum d'aigua tant de la simulació com la de l'assaig i en la taula 7 es pot observar la variació dels resultats de la simulació respecte a els de l'assaig.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en Volum d'aigua (tant per u)	
	Resultats assajos	REV60550WY_PL06
0,0126	0,489	0,456
0,0249	0,589	0,556
0,0381	0,660	0,633
0,0506	0,723	0,691
0,0762	0,816	0,785
0,0889	0,852	0,822

Taula 6 - Fracció en Volum de l'aigua en tant per u de l'assaig experimental de l'article Cornelissen et al. (2007) i la configuració REV60550WY\_PL06.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Variació respecte els resultats exp.(%)
	REV60550WY_PL06
0,0126	6,75
0,0249	5,53
0,0381	4,19
0,0506	4,38
0,0762	3,81
0,0889	3,52

Taula 7 - Variació en tant per cent de la configuració REV60550WY\_PL06 respecte a els resultats de l'assaig experimental de Cornelissen et al. (2007).

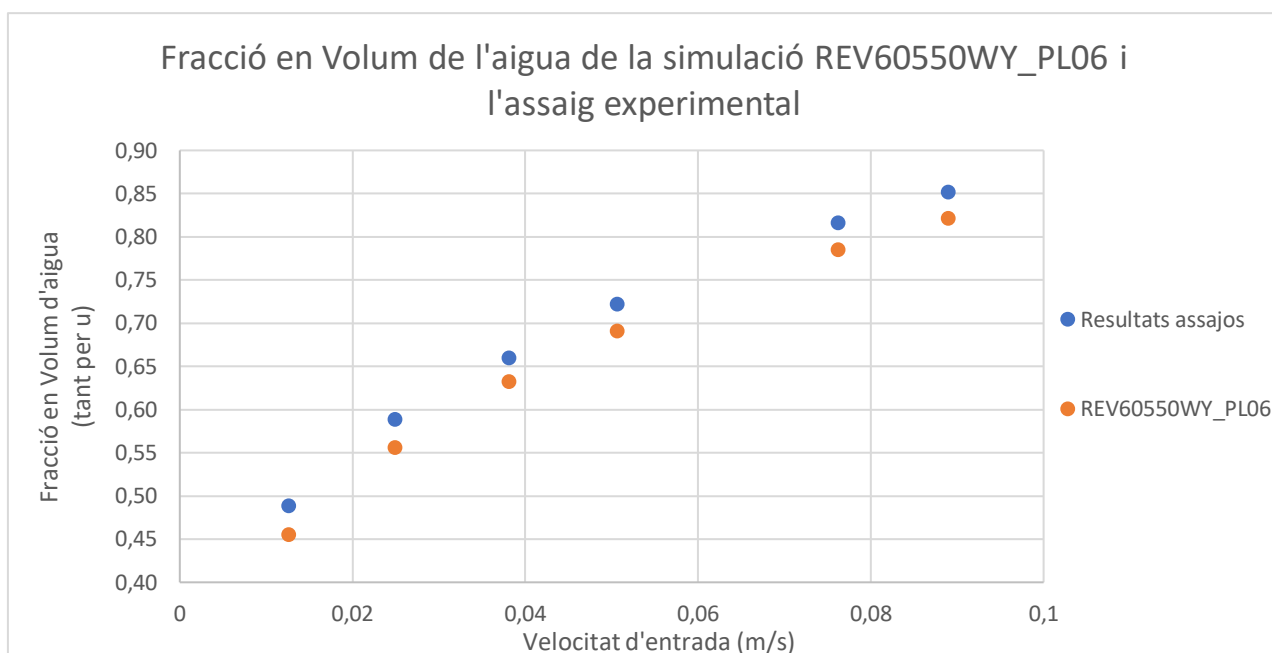


Figura 8 - Gràfic de la fracció en volum d'aigua de la configuració REV60550WY\_PL i dels resultats de l'assaig experimental de Cornelissen et al. (2007).

Observant les dues taules anterior, la diferència no és excessiva, ja que els resultats obtinguts són força propers amb els experimentals. La variació màxima és del 6,75%, en el cas amb la velocitat més petita,  $U=0,0126$  m/s. Tot i aquesta diferència, observant el gràfic de la figura 8, es pot veure que la corba obtinguda pels resultats de la simulació té una tendència molt similar a la dels resultats experimentals. Cal notar que les dades experimentals no donaven valors de l'altura del llit de sorra.

Posteriorment s'ha comparat la configuració REV60550WY\_PL06 amb la configuració REV60550WY per comprovar com afecta augmentar el límit de compactació a 0,65 i com afecta assignar un volum de sorra inicial de 1, tot i ser superior al límit de compactació i no ser possible.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en Volum d'aigua (tant per u)	
	REV60550WY_PL06	REV60550WY
0,0126	0,456	0,457
0,0249	0,556	0,556
0,0381	0,633	0,633
0,0506	0,691	0,691
0,0762	0,785	0,784
0,0889	0,822	0,817

Taula 8 - Fracció en Volum d'aigua en tant per u de les configuracions REV60550WY\_PL06 i REV60550WY.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Variació respecte REV60550WY(%) REV60550WY_PL06
0,0126	-0,22
0,0249	-0,01
0,0381	-0,07
0,0506	0,03
0,0762	0,20
0,0889	0,59

Taula 9 - Variació en tant per cent de la configuració REV60550WY respecte a la configuració REV60550WY\_PL06.

En la taula 8 es pot observar que els resultats entre les dues configuracions són molt similars i en la taula 9 es pot veure que la variació és molt petita, ja que no passa del 0,6%. En observar la figura 9, on es compara l'alçada a la qual arriba la sorra, es pot veure que en la configuració on s'ha assignat una fracció en volum de sorra inicial de 1, la sorra ha assolit una alçada superior que la configuració amb una fracció en volum de sorra inicial de 0,6. Aquest aspecte indica que en assignar un volum superior, el programa no el corregeix. Per tant en la configuració REV60550WY s'ha iniciat amb un volum de sorra més gran, ja que aquesta estava compactada al 100%, sense cap espai entre grans.

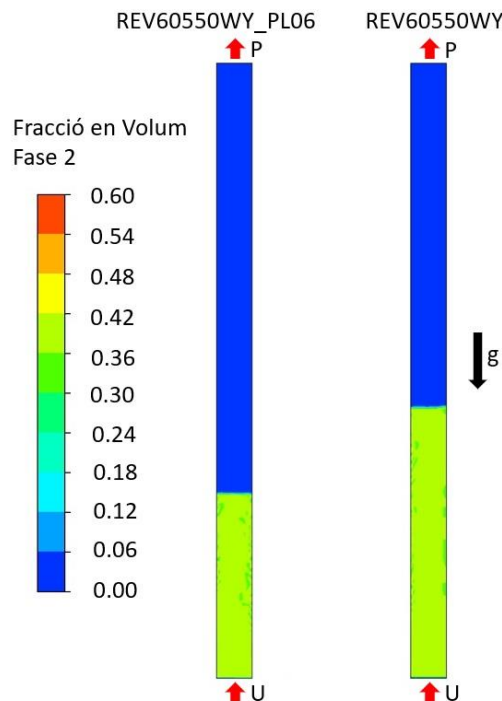


Figura 9 - Comparació altures entre les configuracions REV60550WY\_PL06 (esquerra) i REV60550WY (dreta) per a una velocitat  $U=0,0381$  m/s i temps  $t=30s$ .

Respecte a l'augment del límit de compactació, només canvia el volum inicial de sorra amb el que es realitza la simulació, ja que en la que tingui un límit de compactació més elevat hi haurà una quantitat de sorra més elevada. Això, però, no afecta la fracció en volum finalment assolida, que sol ser la variable rellevant en l'estudi de llits fluiditzats.

#### 4.3. Efecte de la malla

En aquest apartat es compara com afecta la malla en les simulacions. Per això, s'han comparat tres configuracions diferents: la simulació 1, la simulació 2 i la simulació 3, descrites prèviament en el subapartat 3.1.3. Model Fluent, amb mallats de 60x550, 40x250 i 50x400 divisions respectivament. Aquestes tres configuracions són exactament idèntiques a excepció de la malla. Els resultats obtinguts per a la fracció en volum de l'aigua es poden veure en la taula 10 a continuació.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en Volum d'aigua (tant per u)		
	REV60550WY	REV50400WY	REV40250WY
0,0126	0,457	0,457	0,456
0,0381	0,633	0,633	0,633
0,0632	0,740	0,741	0,714
0,0889	0,817	0,815	-

Taula 10 - Fracció en Volum d'aigua en tant per u de configuracions amb mallats diferents REV60550WY, REV50400WY i REV40250WY.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Variació respecte REV60550WY (%)	
	REV50400WY	REV40250WY
0,0126	-0,06	0,05
0,0381	0,03	0,03
0,0632	-0,11	3,53
0,0889	0,25	-

Taula 11 - Variació en percentatge de les configuracions REV50400WY i REV40250WY respecte a la configuració REV60550WY.

Observant els resultats de la taula 10 i la diferència en percentatge, en la taula 11, de les configuracions REV50400WY i REV40250WY respecte a la configuració REV60550WY, agafada com a referència, es pot veure que a mesura que augmenta la velocitat, els resultats són més dispersos. Aquest efecte es pot veure clarament amb la configuració REV40250WY, on el mallat disposa de menys elements. En el cas de la configuració REV50400WY, els resultats són força propers als obtinguts amb la simulació amb el mallat més gran. En el cas de realitzar simulacions amb una velocitat baixa, es podria disminuir la mida del mallat per facilitar la simulació i disminuir el temps d'aquesta.

D'altra banda és interessant conèixer la variabilitat dels resultats obtinguts en el càlcul de la fracció en volum de la sorra. És a dir, saber si el llit fluïditzat és homogeni o no. Això es pot observar amb la desviació estàndard de la mostra de resultats formada pels valors a cada segment de la figura 6. Els valors màxims i mínims de la fracció en volum obtinguts en aquests segments també poden donar una idea de l'homogeneïtat del llit.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Desviació estàndard		
	REV60550WY	REV50400WY	REV40250WY
0,0126	0,0005	0,0001	0,0005
0,0381	0,0006	0,0002	0,0003
0,0632	0,0012	0,0023	0,0409
0,0889	0,0065	0,0074	-

Taula 12 - Desviació estàndard dels resultats de la fracció en volum d'aigua en les configuracions REV60550WY, REV50400WY i REV40250WY.

Velocitat a l'entrada (m/s)		Màxims i mínims de la fracció en volum d'aigua		
		REV60550WY	REV50400WY	REV40250WY
0,0126	Màx	0,455	0,457	0,455
	Mín	0,457	0,457	0,457
0,0381	Màx	0,632	0,632	0,632
	Mín	0,635	0,633	0,634
0,0632	Màx	0,738	0,739	0,686
	Mín	0,742	0,753	0,870
0,0889	Màx	0,814	0,812	-
	Mín	0,858	0,858	-

Taula 13 - Fracció en volum d'aigua màxima i mínima de les configuracions REV60550WY, REV50400WY i REV40250WY per a diferents velocitats.

Observant la desviació estàndard en la taula 12 i els màxims i mínims en la taula 13, es veu que el llit de sorra en expandir-se és homogeni i no hi ha grans variacions en la fracció en volum dins d'una mateixa simulació.

#### 4.4. Sensibilitat del model

En aquest apartat es comparen les configuracions restants mencionades en l'apartat 3.1.3

Model fluent, les quals són:

- REV60550HG – Model d'arrossegament de Huilin-Gidaspow
- REV60550WY\_RE104 – Criteri de convergència dels residuals de  $10^{-4}$
- REV60550WY\_0001 – Pas de temps de 0,0001 segons
- REV60550WY\_PP – Model de temperatura granular Phase Property

Els resultats d'aquestes configuracions es poden observar en la taula 14 a continuació i també es pot observar en la taula 15 la variació en percentatge de les configuracions respecte a la configuració REV60550WY, tal com s'ha fet en l'apartat anterior.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en Volum d'aigua (tant per u)				
	REV60550WY	REV60550HG	REV_RE104*	REV_0001**	REV_PP***
0,0126	0,457	0,438	0,457	0,454	0,457
0,0249	0,556	0,553	0,557	0,554	0,556
0,0381	0,633	0,649	0,630	0,626	0,633
0,0506	0,691	0,726	0,691	0,688	-
0,0632	0,740	0,784	0,745	0,726	0,739
0,0762	0,784	0,813	0,785	0,764	-
0,0889	0,817	0,832	0,819	0,793	0,813
0,1	0,842	0,855	0,843	0,815	-

Taula 14 - Fracció en volum d'aigua en tant per u de les configuracions REV60550WY, REV60550HG, REV60550WY\_RE104, REV60550WY\_0001 i REV60550WY\_PP.

\*:REV60550WY\_RE104. \*\*:REV60550WY\_0001. \*\*\*:REV60550WY\_PP

Velocitat a l'entrada (m/s)	Variació respecte REV60550WY(%)			
	REV60550HG	REV_RE104*	REV_0001**	REV_PP***
0,0126	4,15	-0,06	0,59	-0,05
0,0249	0,59	-0,07	0,40	0,01
0,0381	-2,52	0,53	1,05	0,06
0,0506	-5,05	-0,04	0,40	-
0,0632	-5,99	-0,65	1,93	0,08
0,0762	-3,77	-0,24	2,56	-
0,0889	-1,85	-0,23	2,92	0,48
0,1	-1,46	-0,09	3,23	-

Taula 15 - Variació en percentatge de la fracció en volum d'aigua de les configuracions REV60550HG, REV60550WY\_RE104, REV60550WY\_0001 i REV60550WY\_PP respecte a la configuració REV60550WY.

\*:REV60550WY\_RE104. \*\*:REV60550WY\_0001. \*\*\*:REV60550WY\_PP

Observant els resultats en les dues taules anteriors, en utilitzar el model d'arrossegament de Huilin-Gidaspow en comptes del de Wen-Yu, la corba que segueixen els resultats és més pronunciada, tal com es pot veure en el gràfic de la figura 10 que es mostra a continuació. En un inici, la fracció en volum és pràcticament igual en les dues simulacions. A mesura que la velocitat del fluid augmenta, la fracció en volum de la configuració REV60550HG és més elevada que la de la configuració REV60550WY, però un cop la velocitat continua elevant-se, la fracció en volum tendeix a igualar-se.

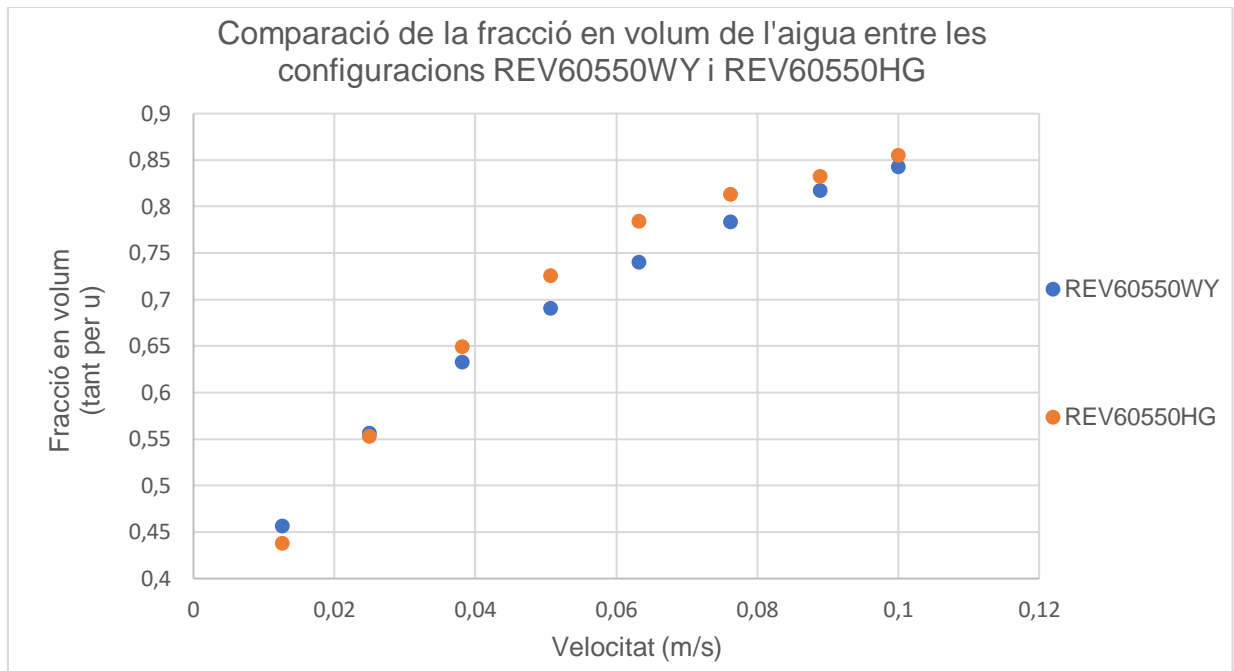


Figura 10 - Gràfic de la fracció en volum d'aigua de les configuracions REV60550WY i REV60550HG.

En la configuració REV60550WY\_RE104 es pot veure que no afecta en gran manera augmentar el criteri de convergència dels residuals de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$ . Els resultats obtinguts són força similars als de la configuració REV60550WY, sense arribar a ser la diferència entre ells superior al 0,7%.

En canvi, en el cas de la configuració REV60550WY\_0001, es pot observar que a mesura que augmenta la velocitat, la diferència entre els resultats és major. La corba, en aquest cas, tendeix a aplanar-se quan les velocitats són elevades, com es pot veure en el gràfic de la figura 11 a continuació, i la diferència entre les configuracions arriba a superar el 3%.

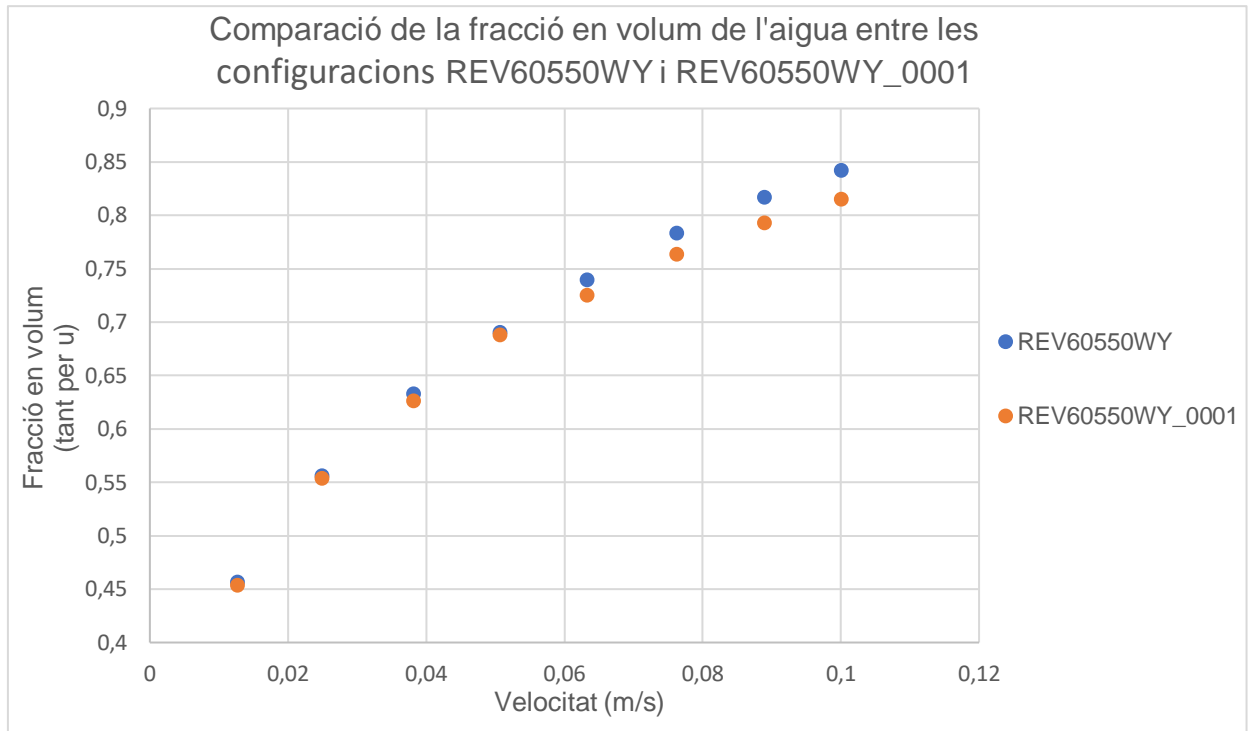


Figura 11 - Gràfic de la fracció en volum de l'aigua de les configuracions REV60550WY i REV60550WY\_0001.

En canviar el model de temperatura granular es pot veure que els resultats no varien gaire, independentment de quin s'utilitza. Per més detall, en la taula 16 es pot observar la desviació estàndard i en la taula 17 els màxims i mínims de la fracció en volum d'aigua per a les diferents velocitats. Aquests valors també ens indiquen que el llit de sorra en expandir-se és homogeni i no varia en funció del model escollit, tal com ja s'havia observat en l'estudi sobre l'efecte de canviar la malla.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Desviació estàndard	
	REV60550WY	REV60550WY_PP
0,0126	0,0005	0,0005
0,0249	0,001	0,0003
0,0381	0,0006	0,0004
0,0632	0,0012	0,0021
0,0889	0,0065	0,012

Taula 16 - Desviació estàndard dels resultats de la fracció en volum d'aigua en les simulacions REV60550WY i REV60550WY\_PP.



Velocitat a l'entrada (m/s)		Màxims i mínims de la fracció en volum d'aigua	
		REV60550WY	REV60550WY_PP
0,0126	Màx	0,5448	0,5437
	Mín	0,5431	0,5414
0,0249	Màx	0,4452	0,4446
	Mín	0,4396	0,4433
0,0381	Màx	0,3676	0,3686
	Mín	0,3647	0,3668
0,0632	Màx	0,2618	0,2631
	Mín	0,2577	0,2547
0,0889	Màx	0,1862	0,1913
	Mín	0,1422	0,1098

Taula 17 - Fracció en volum d'aigua màxima i mínima de les configuracions REV60550WY i REV60550WY\_PP per a diferents velocitats.

#### 4.5. Resultats configuració REV60550WY\_2V

Obtinguts els resultats de la configuració REV60550WY\_2V, s'han comparat amb la configuració REV60550WY, ja que comparteixen el mateix model a excepció de la geometria. En la taula 18 es poden veure els resultats de la fracció en volum d'aigua i en la taula 19 la variació en percentatge de la configuració REV60550WY\_2V respecte a la configuració REV60550WY.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Fracció en volum d'aigua (tant per u)	
	REV60550WY	REV60550WY_2V
0,0126	0,457	0,410
0,0249	0,556	0,476
0,0381	0,633	0,550
0,0506	0,691	0,594
0,0632	0,740	0,649
0,0762	0,784	0,680

Taula 18 - Fracció en volum d'aigua en tant per u de les configuracions REV60550WY i REV60550WY\_2V.

Velocitat a l'entrada (m/s)	Variació respecte REV60550WY(%) REV60550WY_2V
0,0126	10,27
0,0249	14,54
0,0381	13,04
0,0506	14,02
0,0632	12,28
0,0762	13,26

Taula 19 - Variació en percentatge de la fracció en volum d'aigua de la configuració REV60550WY\_2V respecte a la configuració REV60550WY.

En observar les dues taules anteriors es pot veure un gran desajust entre les dues configuracions. La diferència entre aquestes és superior al 10% per a totes les velocitats simulades. Aquesta variació és força significativa, ja que s'esperava que les dues configuracions es comportessin igual. Comparant les alçades, en la figura 12, es pot observar que en la configuració REV60550WY\_2V es crea un passadís per a l'aigua just en la zona de contacte amb la paret del filtre. A més la sorra queda més compactada quan hi ha el volum amb aigua en la part inferior. Una explicació per a aquest comportament podria ser que al trobar el tap format pel llit fluïditzat, es creés una recirculació de l'aigua.

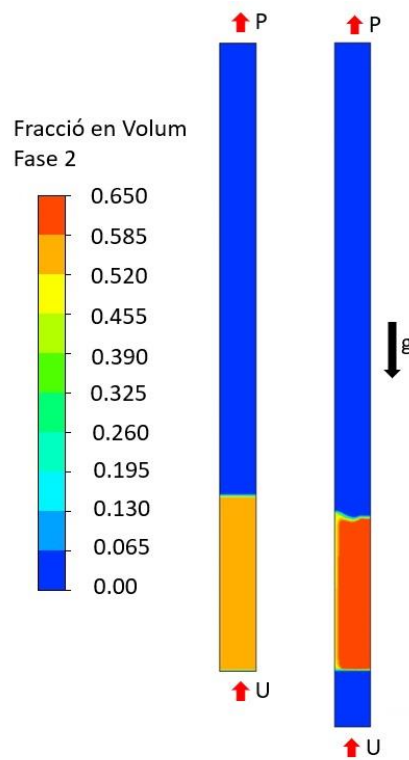


Figura 12 -Comparació alçades entre la configuració REV60550WY (esquerra) i la REV60550WY\_2V (dreta) per a una velocitat  $U=0,0126$  m/s i a temps  $t=30$ s. La fracció en volum és de la sorra. La fracció en volum d'aigua a la zona on hi ha sorra (porositat) és 1 menys la fracció en volum de sorra.

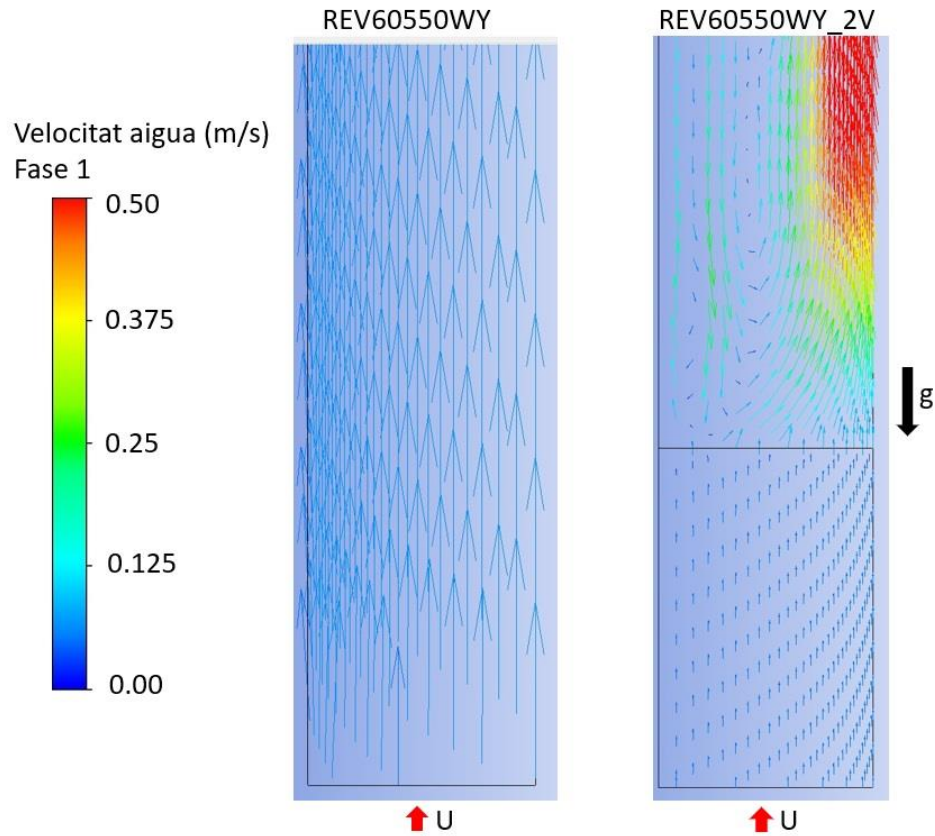


Figura 13 - Comparació dels vectors velocitat en les configuracions REV60550WY (esquerra) i REV60550WY\_2V (dreta) en l'entrada del fluid per a una velocitat  $U=0,0506$  m/s.

En la figura 13 es pot observar que en la configuració que incorpora el volum d'aigua previ, la de la dreta, quan el fluid es topa amb la sorra es crea una recirculació, quan en la configuració REV60550WY el fluid sempre va en direcció vertical.

Per entendre millor l'efecte d'afegir aquest volum d'aigua previ al filtre, s'ha contactat amb Ansys i a dia d'avui s'està esperant una resposta.

## 5 SIMULACIÓ FILTRE 3D

Un cop s'han obtingut els resultats i aquests s'han comparat en les versions en 2D, s'ha volgut implementar aquesta metodologia en un filtre 3D. A causa de una geometria i una malla més complexa, no tots els models que s'han simulat han pogut obtenir resultats.

### 5.1. Geometria i mallat 3D

El filtre que s'ha utilitzat en aquestes simulacions és el que es pot veure a la figura 14. Aquest filtre cilíndric consta de tres parts diferents. Una és el cos, el qual té un diàmetre interior de 110 mm i una altura interior de 200 mm. L'orifici d'entrada del fluid en el procés de contrarentat és de 13,5 mm de diàmetre. Una altra part del filtre és la tapa, la qual es pot veure en la part superior. Aquesta té un diàmetre de 170 mm i l'orifici de sortida del fluid és igual que el d'entrada, de 13,5 mm de diàmetre. A més, aquesta conté un difusor, la funció d'aquest és evitar, que en ús normal del filtre, l'aigua entri a pressió i pugui fer un forat a la sorra. El difusor fa que l'aigua s'escampi i es reparteixi més uniformement. L'última part del filtre serveix com a suport de la reixa que evita que la sorra baixi. Aquesta peça té uns forats en forma de triangle per on, en el procés de contrarentat, pujarà l'aigua.

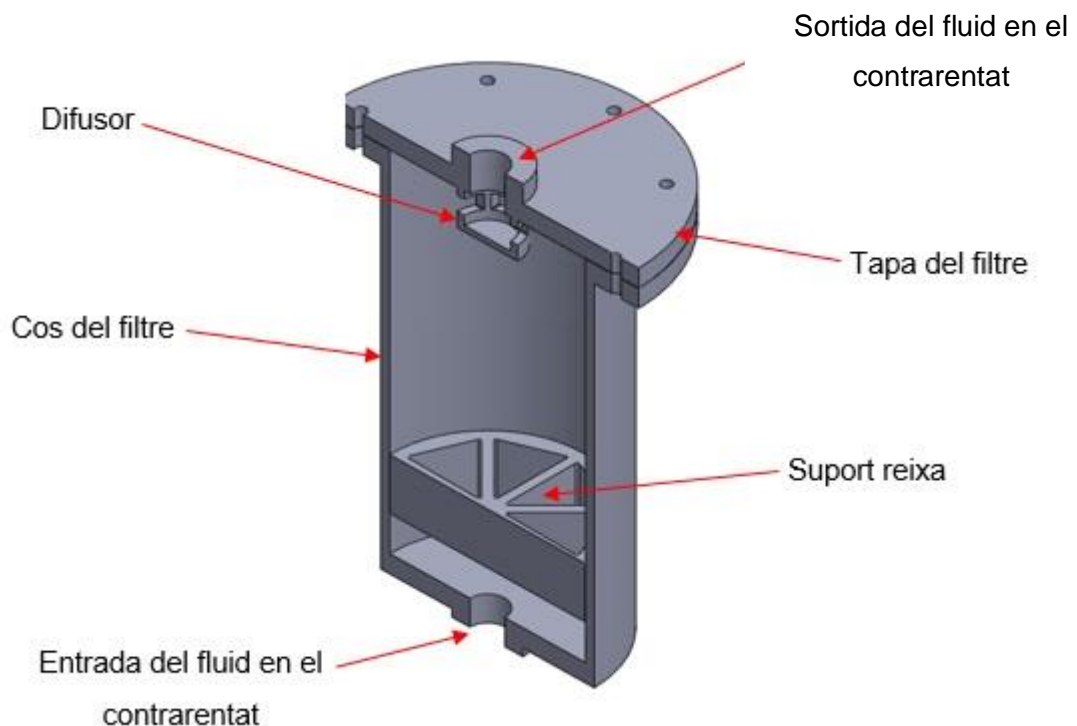


Figura 14 - Filtre utilitzat per a les simulacions 3D.

Per a la realització de les simulacions s'ha agafat el negatiu d'aquest filtre. El negatiu és una geometria que representa els espais interiors buits del filtre. Per reduir complexitat, temps de simulació i el nombre d'elements de la malla, s'ha agafat només un quart del filtre, ja que el filtre té simetria. Les parets interiors que s'han generat pel tall realitzat, s'han definit com a simètriques, representant que en l'altre costat també hi hauria fluid i sorra. Totes les cares que toquen amb el filtre s'han definit com a parets.

En aquesta geometria es poden diferenciar 3 parts diferents, com es pot observar en la figura 15. Aquestes són la part superior del filtre, la zona on es troba la sorra inicialment i la part inferior del filtre. S'ha definit una zona de contacte en la superfície entre la part superior i la zona de la sorra. Això permet que el fluid pugui circular entre zones, com si realment no hi hagués cap separació. També s'ha definit una altra zona de contacte en la superfície entre la zona de la sorra i la part inferior. Aquesta última representa la reixa del filtre i només estan en contacte els forats d'aquesta.

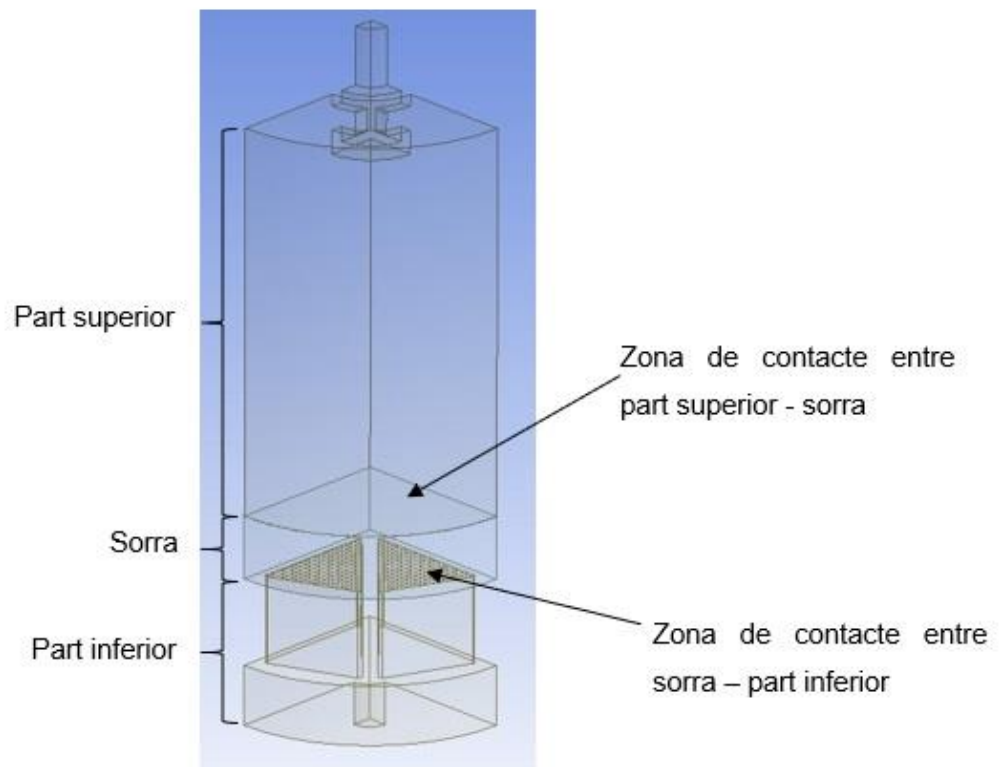


Figura 15 - Parts de la geometria utilitzada per a les simulacions 3D.

La malla creada per aquest model és molt més complexa que en el cas 2D, per això, es pot veure en detall en l'annex A. La malla està formada per tetraedres i consta de 1,18 milions d'elements.

## 5.2. Models i resultats de les simulacions

En aquest apartat es comenten les simulacions realitzades en els models 3D. La configuració del model de Fluent utilitzat és igual al dels casos 2D, encara que s'han realitzat canvis en el model de temperatura granular. Aquests canvis es comentaran quan es descriguin les simulacions. El model es pot observar en l'annex B.

Les nomenclatures de les simulacions determinen les característiques d'aquestes. Primer s'indica que és en tres dimensions (3D). Seguidament indica quin model de temperatura granular segueix, si Partial Differential Equation (PDE) o Phase Property (PP). A continuació el nombre de volums que formen la geometria utilitzada en la simulació, dos volums (2V) si no s'ha tingut en compte la part inferior i tres volums (3V) si s'ha tingut en compte. Per finalitzar pot contenir alguna indicació d'una característica de la simulació per diferenciar-la de les altres.

### 5.2.1. Simulació 3DPDE\_2V

En aquesta primera simulació, s'ha volgut replicar el mateix model utilitzat en les simulacions en dues dimensions. S'ha omès la part inferior del filtre, tal com s'ha fet en la geometria en dues dimensions i, per tant, també s'ha omès la reixa del filtre. En la figura 16 es mostra la geometria utilitzada.

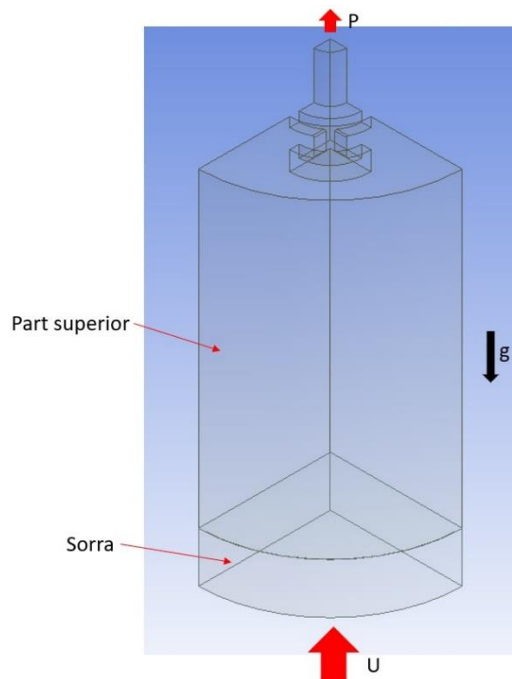


Figura 16 - Geometria simulació 3DPDE\_2V.

Les característiques d'aquesta simulació es poden veure en la taula 20.

Velocitat d'entrada (m/s)	0,015
Pas de temps (s)	0,0001
Criteri de convergència	$10^{-4}$
Model de temperatura granular	Partial Differential Equation
Conductivitat granular	syamlal-obrien

Taula 20 - Dades de la simulació 3DPDE\_2V del filtre 3D.

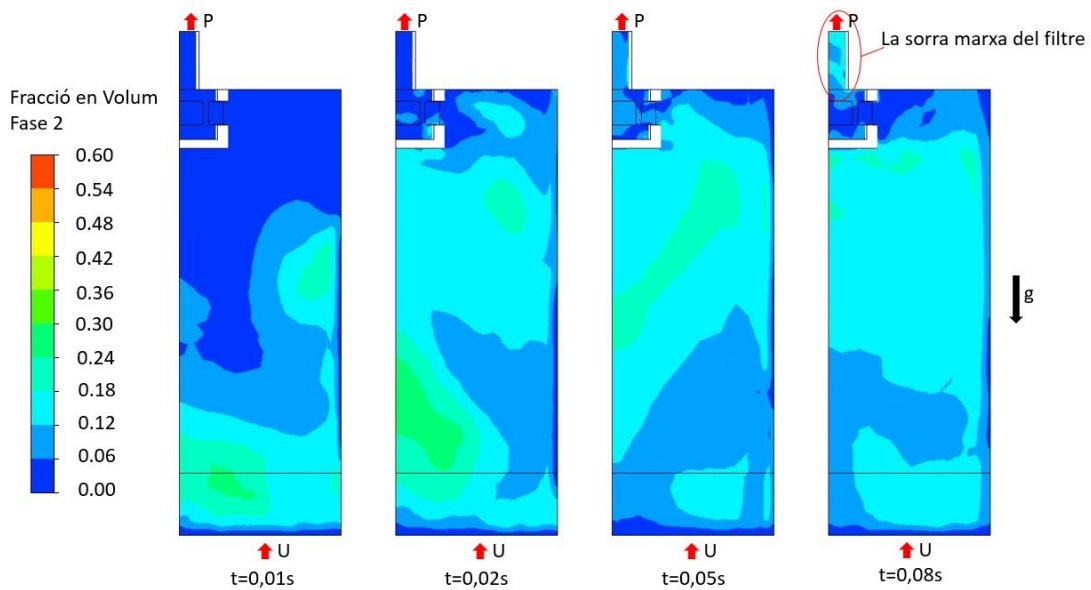


Figura 17 - Evolució en el temps de la simulació 3DPDE\_2V per a  $U=0,015$ .

En la figura 17 es pot observar l'evolució de la simulació amb el pas del temps. Aquesta figura representa la fracció en volum de la sorra. Tot i ser una velocitat molt petita, es pot observar que la sorra marxa fora del filtre al cap d'un temps de simulació.

### 5.2.2. Simulació 3DPP\_3VLLARG

En la simulació 3DPP\_3VLLARG, s'ha realitzat canvis respecte a la simulació esmentada anteriorment. A diferència de la simulació anterior, s'ha utilitzat el filtre complet, amb la part inferior inclosa. Tot i això, no s'ha incorporat la reixa per no dificultar el càlcul i tampoc s'ha definit la velocitat de la sorra en la part inferior del filtre amb un valor de 0, per prohibir així que hi accedeixi. Degut a que la sorra ha marxat en la simulació anterior, en aquesta s'ha augmentat l'alçada del filtre. Aquest ha passat a tenir una alçada de 500 mm, en comptes dels 200 mm del filtre original, tal com s'observa en la figura 18.

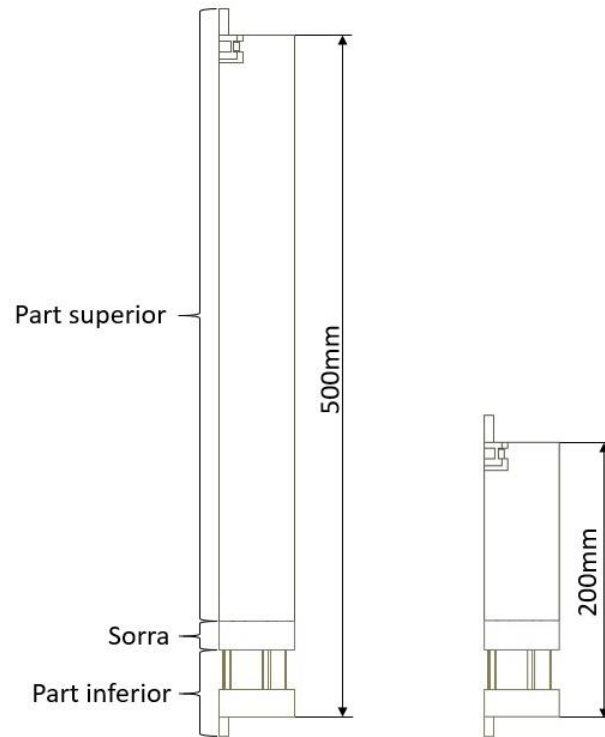


Figura 18 - Comparació alçada del filtre modificat (esquerra) amb el filtre original (dreta).

Respecte a el model de la simulació, s'ha volgut comprovar l'efecte de canviar el model de temperatura granular. Per consegüent, s'ha canviat el model a Phase Property, en comptes de Partial Differential Equation. Aquest nou model permet ajustar la temperatura granular, la qual se li ha assignat un valor constant de 0. Els paràmetres de la simulació es mostren en la taula 21.

Velocitat d'entrada (m/s)	0,01
Pas de temps (s)	0,001
Criteri de convergència	$10^{-4}$
Model de temperatura granular	Phase property
Temperatura granular	constant = 0

Taula 21 - Dades de la simulació 3DPP\_3VLLARG del filtre 3D.

Observant els resultats obtinguts, figura 19, es pot observar que la sorra cau a la part inferior tot just començar la simulació. Això és degut al fet que no s'ha introduït cap restricció i la velocitat d'entrada és massa petita per a suportar el pes de la sorra i fer que s'expandeixi cap amunt.



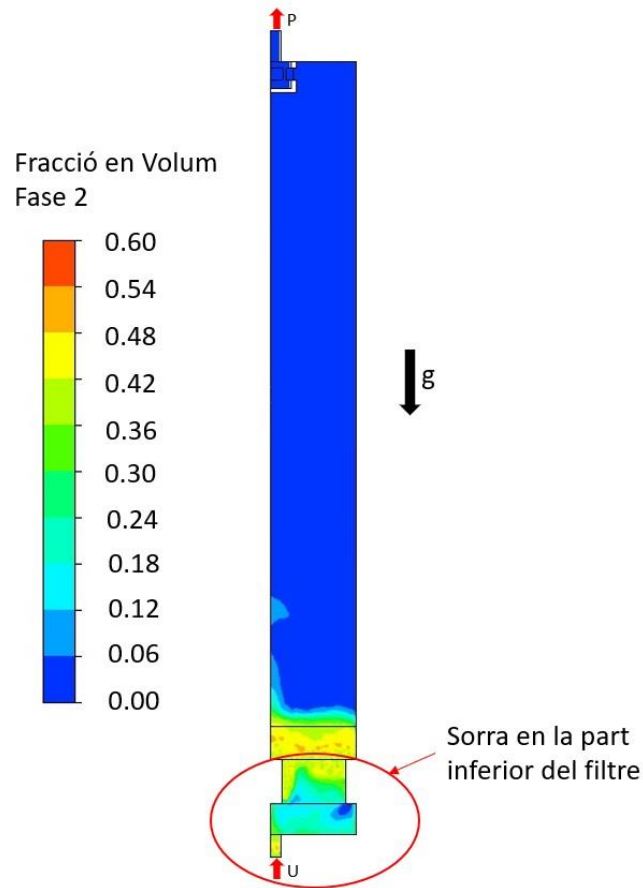


Figura 19 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_3VLLARG a t=0,03s.

### 5.2.3. Simulació 3DPP\_3V

A causa dels problemes obtinguts en la simulació anterior, en aquest cas s'ha volgut comprovar si augmentant la velocitat, aquesta seria capaç d'evitar que la sorra baixés a la part inferior. Per això, s'ha utilitzat un model exactament idèntic a l'anterior, però amb una velocitat de 1 m/s a l'entrada. Com no s'ha previst que la sorra pugui arribar a dalt, sinó que l'objectiu d'aquesta simulació és comprovar si la sorra baixa a la part inferior o no, s'ha utilitzat la geometria original del filtre, per evitar que pugui afectar a la simulació. Els paràmetres de la simulació es mostren en la taula 22.

Velocitat d'entrada (m/s)	1
Pas de temps (s)	0,001
Criteri de convergència	10 <sup>-4</sup>
Model de temperatura granular	Phase property
Temperatura granular	constant = 0

Taula 22 - Dades de la simulació 3DPP\_3V del filtre 3D.

En aquest cas, tal com es pot veure a la figura 20, la sorra ha tornat a baixar a la part inferior. En ser la velocitat molt més elevada que la simulació anterior, aquesta ha tardat més a baixar, a partir dels 0,27 segons. Tot i això, aquest mètode no obté resultats bons i, per tant es descarta. S'ha d'evitar l'accés de la sorra en la part inferior.

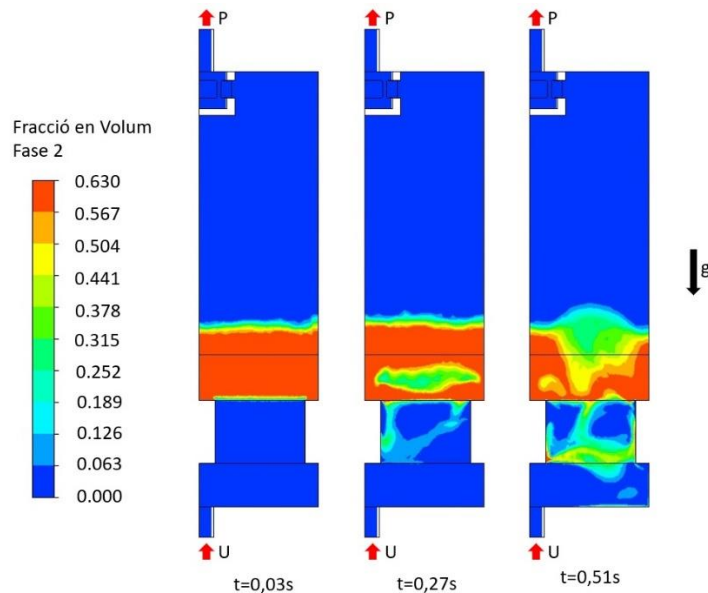


Figura 20 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_3V a  $t=0,03s$ ,  $t=0,27s$  i  $t=0,51s$  amb  $U=1m/s$ .

#### 5.2.4. Simulació 3DPP\_3VU0

Per a aquesta simulació, s'ha limitat l'accés de la sorra a la part inferior del filtre, tal com s'ha fet en l'apartat 3.2. Adaptació del model. Per això, s'ha limitat la velocitat de la fase 2, la sorra, a un valor de 0 m/s, fent que no hi pugui accedir. Per aquesta raó la nomenclatura de la simulació incorpora els caràcters U0, referents a velocitat en la part inferior igual a 0.

La geometria és igual a l'anterior, el filtre original de 200 mm d'alçada interior, a excepció de la zona de la sorra. Per a aquesta simulació, la fase 2 no s'assignarà a un volum independent dels altres. Per assignar el volum on es troba la sorra, s'ha realitzat com en les simulacions en dues dimensions. Aquest procés es basa a delimitar una regió dins d'un volum. La regió la qual s'ha delimitat és exactament igual al volum de la sorra que s'ha utilitzat en les simulacions anteriors.

Els paràmetres de la simulació es mostren en la taula 23.

Velocitat d'entrada (m/s)	0,05
Pas de temps (s)	0,0001
Criteri de convergència	$10^{-4}$
Model de temperatura granular	Phase property
Temperatura granular	algebraic

Taula 23 - Dades de la simulació 3DPP\_3VU0 del filtre 3D.

La simulació ha divergit als 0,0641 segons, degut a que els residuals s'han disparat. A mesura que el càlcul avançava, no s'ha complert el criteri de convergència i el residual cada cop era més gran. La figura 21 mostra el moment on la simulació s'ha aturat. Es pot veure que la sorra ha accedit a la zona inferior del filtre, tot i no ser possible per com s'ha definit el model.

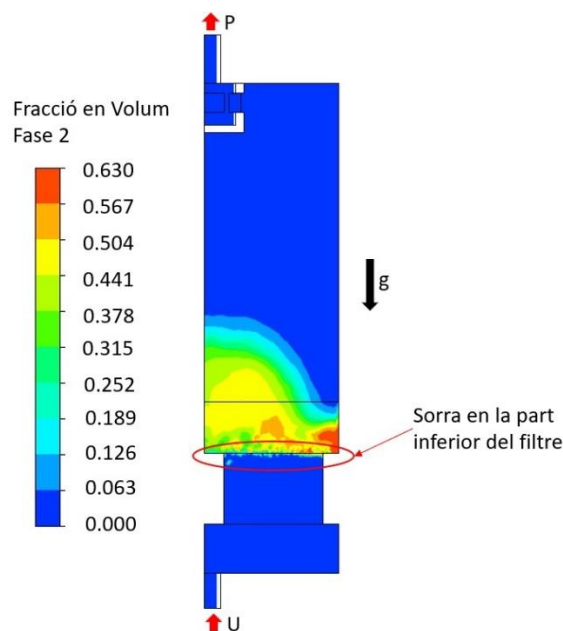


Figura 21 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_3VU0 a  $t=0,0641$  amb  $U=0,05\text{m/s}$ .

### 5.2.5. Simulació 3DPP\_2VMG

En la simulació 3DPP\_3VU0, s'ha descartat utilitzar la geometria completa del filtre. En aquesta no es té en compte la part inferior, perquè ha generat problemes en les altres simulacions. La geometria utilitzada es pot veure en la figura 22 a continuació.

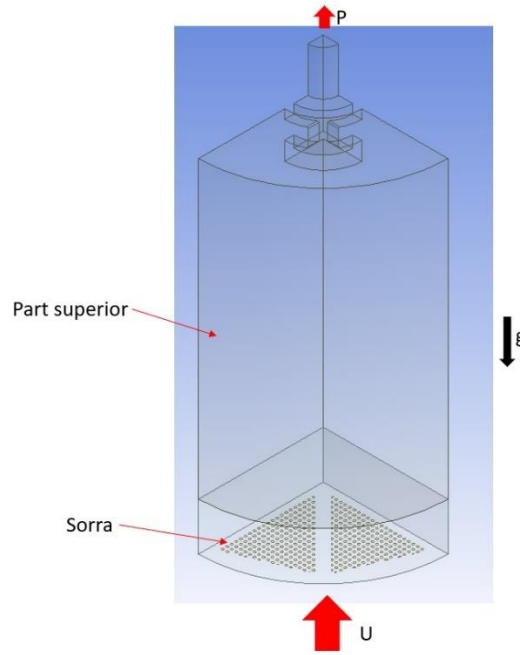


Figura 22 - Geometria simulació 3DPP\_2VMG.

A diferència de la geometria de la simulació 3DPDE\_2V, aquesta incorpora els forats de la reixa. Els forats no s'han aplicat al llarg de tota la superfície inferior del filtre, només s'han aplicat en les zones per on passa el fluid, tal com es pot veure a la figura 23. Aquesta forma de triangle resultant és degut a la peça que aguanta aquesta reixa, que és cilíndrica, però consta de vuit forats de forma triangular per on passa el fluid. Aquesta peça es mostra amb més detall en la figura 24.

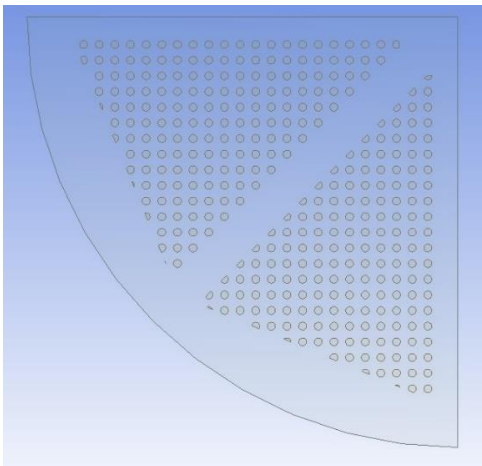


Figura 23 - Forats de la reixa del filtre.

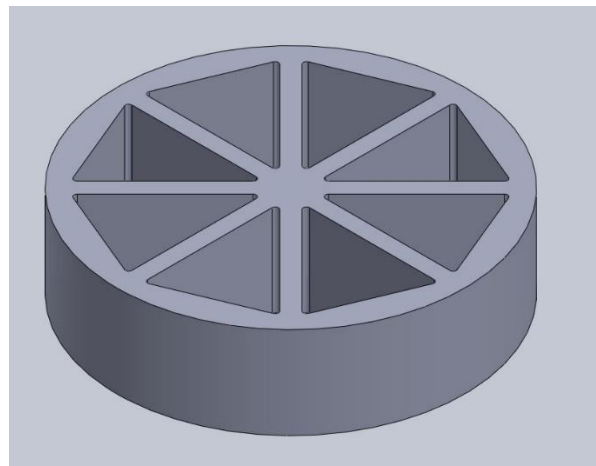


Figura 24 - Suport de la reixa del filtre.

La velocitat s'ha assignat als forats de la reixa, mostrats en la figura 23. Per això s'ha partit d'una velocitat a l'entrada del filtre, encara que s'hagi omès aquesta part de la geometria. En aquest cas s'ha agafat una velocitat de 0,7 m/s, inferior a la de la simulació 3. El diàmetre de l'entrada del filtre és de 13,5 mm, com s'ha explicat en l'apartat 5.1. Geometria i mallat 3D. Amb aquestes dades es pot calcular el cabal, tal com es mostra en l'equació 1.

$$Q = U \cdot A = U \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (\text{Eq.1})$$

El cabal (Q) és de  $1,002 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ . L'àrea que ocupen els forats, només en el quart de filtre estudiat, és de  $537,54 \text{ mm}^2$ , donant un nombre de forats de 684,42. Aquest nombre no és enter pel fet que hi ha forats on la seva àrea queda tallada per la forma del suport de la reixa (figura 24). Per obtenir l'àrea dels forats en tot el filtre, s'ha de multiplicar per 4. Amb aquestes dades s'obté la velocitat, a partir de l'equació 2, que circularà pels forats i que s'ha introduït en el model de Fluent. La velocitat (U) en aquesta simulació és de 0,0466 m/s.

$$U_{\text{forats}} = \frac{Q}{4 \cdot A} \quad (\text{Eq.2})$$

En aquesta simulació s'ha decidit canviar la malla per una amb un major nombre d'elements i més petits. Aquest canvi dona més exactitud a la simulació, però augmenta el temps de càlcul considerablement. La malla consta de 3,1 milions d'elements. Es poden veure les propietats d'aquesta en l'annex A. Per aquesta raó s'ha incorporat MG (malla gran) en el nom de la simulació, referent a malla gran.

Els paràmetres de la simulació es mostren en la taula 24.

Velocitat d'entrada forats (m/s)	0,0466
Pas de temps (s)	0,001
Criteri de convergència	$10^{-4}$
Model de temperatura granular	Phase property
Temperatura granular	Algebraic

Taula 24 - Paràmetres de la simulació 3DPP\_2VMG del filtre 3D.

La simulació 3DPP\_2VMG no ha donat problemes. S'ha simulat durant 1,5 segons degut a la lentitud de càlcul causada per la malla tan gran. Com es pot observar en la figura 25, la velocitat de l'aigua que s'ha assignat és massa baixa. Es pot veure en la part inferior del filtre que la sorra s'ha expandit, però la resta del llit segueix força compactat. Degut a la

incorporació de la reixa, en els extrems del filtre, la sorra no es veu tan afectada com en les simulacions anteriors.

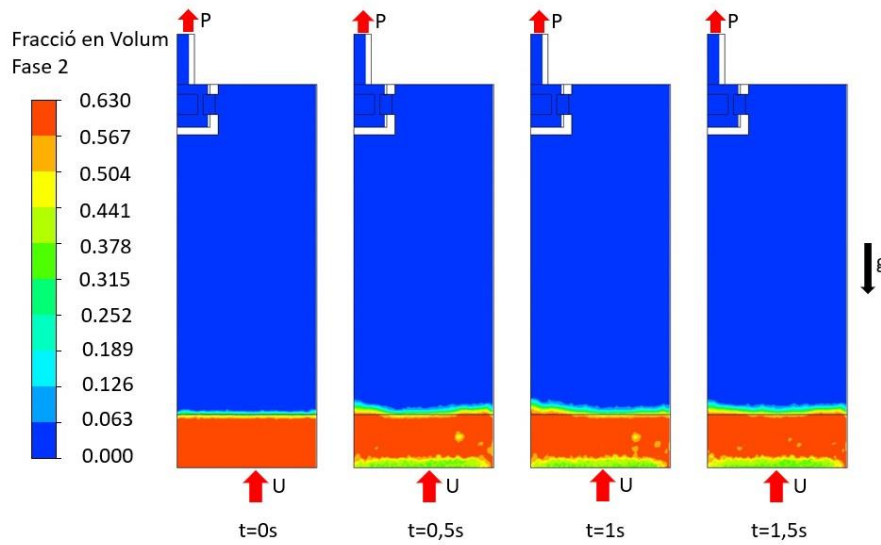


Figura 25 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_2VMG a temps  $t=0s$ ,  $t=0,5s$ ,  $t=1s$  i  $t=1,5s$  amb velocitat  $U=0,0466m/s$  en els forats de la reixa.

Posteriorment, s'ha augmentat la velocitat un 50%, per comprovar que no es produïa cap error i el llit fluïditzava. A la figura 26 es pot observar com el llit de sorra comença a expandir-se.

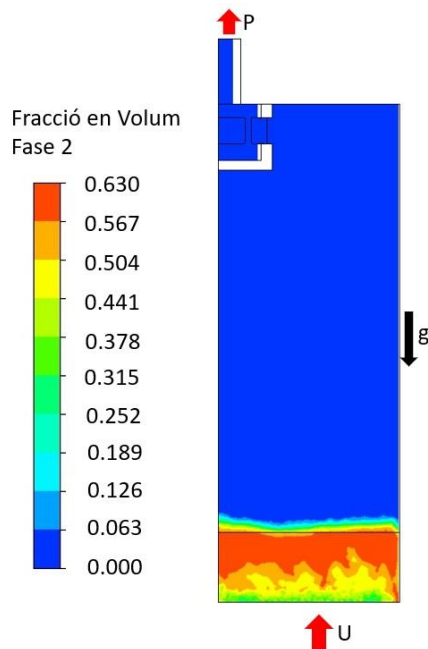


Figura 26 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_2VMG a temps  $t=2,5s$  i amb velocitat  $U=0,0699m/s$  en els forats de la reixa.

Finalment s'ha augmentat un cop més la velocitat, aquest cop a 0,2 m/s en els forats de la reixa. S'ha observat el comportament del llit en diferents plans. En la figura 27 es poden observar els sis plans estudiats i la distància d'aquests respecte el pla que talla verticalment el filtre per la meitat. Es pot observar com costa més que el llit fluiditzi en les zones properes a la paret del filtre i en la zona central. Això és degut a la geometria de la peça que suporta la reixa.

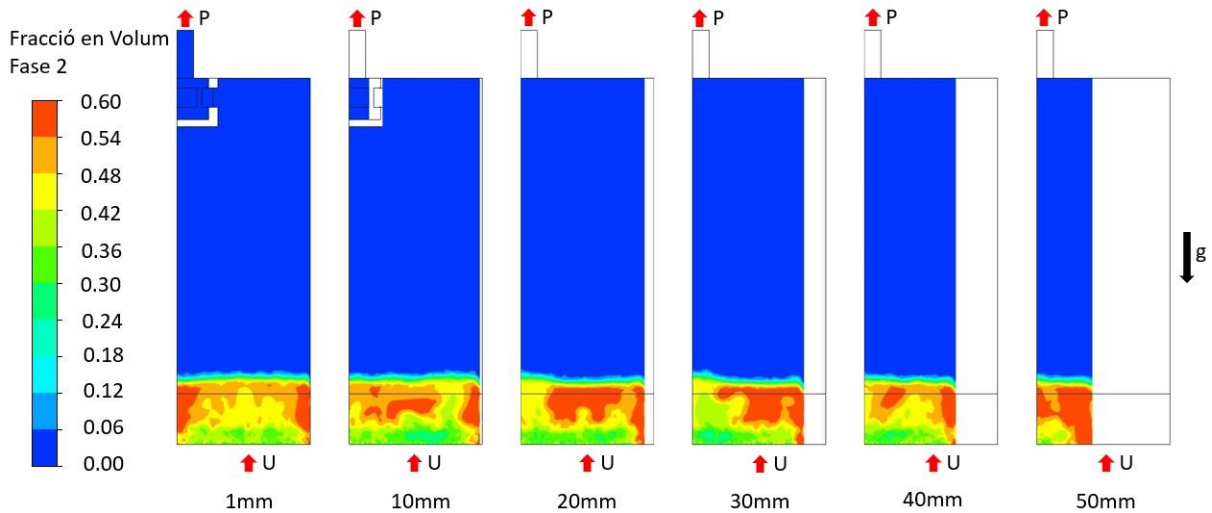


Figura 27 - Fracció en volum de sorra de la simulació 3DPP\_2VMG a temps  $t=2,29s$  i amb velocitat d'entrada  $U=0,2m/s$  en els forats de la reixa en diversos plans del filtre .

En la figura 28 es pot observar els vectors de velocitat de l'aigua i com el fluid segueix una trajectòria força vertical. També es troben representats en els sis plans esmentats anteriorment.

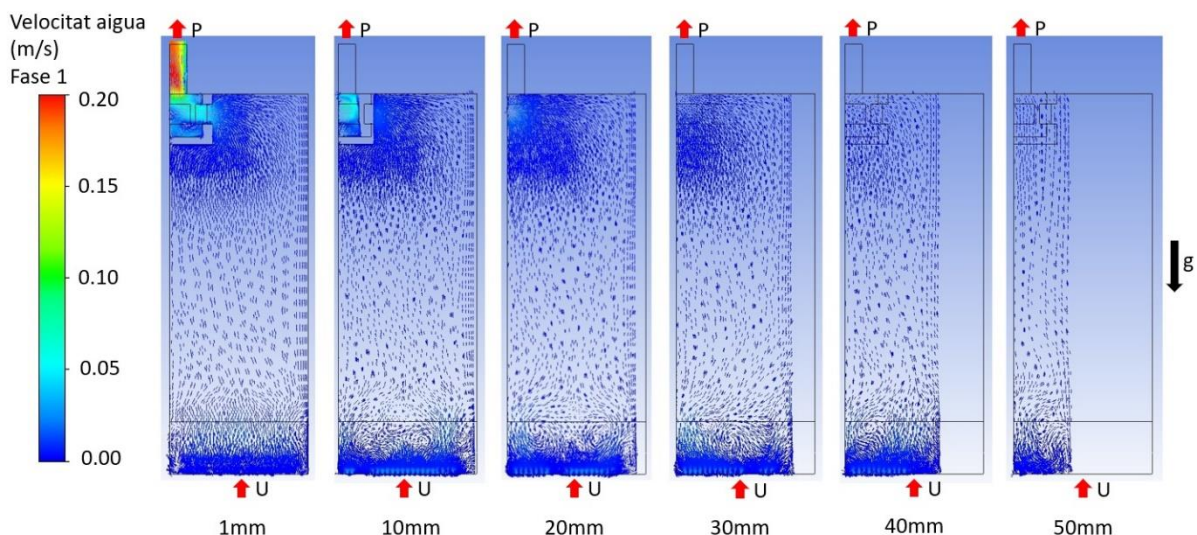


Figura 28 – Vectors de velocitat de l'aigua de la simulació 3DPP\_2VMG a temps  $t=2,29s$  i amb velocitat d'entrada  $U=0,2m/s$  en els forats de la reixa en diversos plans del filtre .

## 6 CONCLUSIONS

De les simulacions en dues dimensions (2D) s'ha pogut observar com la malla afecta els resultats. La diferència de mallas es nota més significativament a mesura que s'augmenta la velocitat d'entrada del fluid. Per tant, és important tenir en compte quines són les velocitats del sistema per poder decidir si és necessari una malla més fina, que comportarà un temps de càlcul més gran.

En la variació del model d'arrossegament (drag), s'ha observat que la corba de la fracció en volum de la simulació REV60550HG, que es regeix pel model de Huilin-Gidaspow, és més pronunciada que la simulació REV60550WY, que es regeix pel model de Wen-Yu. Observant la corba del gràfic de les dades experimentals de l'article de Cornelissen et al. (2007) s'assimila més a la simulació regida pel model de Wen-Yu.

La variació de com es descriu la geometria no afecta en gran manera, tant si és un cos de revolució com una secció rectangular del filtre. Disminuir el valor del criteri de convergència de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  tampoc suposa un canvi en els resultats obtinguts, ja que la variació és mínima.

En canviar el pas de temps de 0,001s a 0,0001s es nota una petita variació entre els resultats a mesura que la velocitat de la simulació és més elevada.

Respecte al model de temperatura granular, s'han obtingut resultats pràcticament iguals tant si s'ha utilitzat el model de Partial Differential Equation o el de Phase Property en les simulacions 2D.

Respecte en agafar la geometria completa del filtre, és a dir, amb una zona d'aigua prèvia on no pot accedir la sorra, no ha donat resultats bons. Aquest apartat queda pendent a la resposta que pugui donar ANSYS, tant en els casos en dues dimensions, com en els de tres dimensions. En aquests moments, sense tenir una solució, es descarta la utilització d'aquests tipus de geometries per a aquestes simulacions.

Per a la simulació de filtres en tres dimensions es proposa realitzar-les sense la part inferior del filtre i calculant el cabal corresponent a l'entrada. El model de temperatura granular és indiferent, ja que, com s'ha comentat abans, s'han obtingut resultats similars en el cas 2D. Es recomana la utilització d'un pas de temps de 0,001s i uns residuals de  $10^{-4}$  per un càlcul més precís.



Com s'ha comentat a l'inici del treball, degut a la situació viscuda a causa del COVID-19, queda pendent la simulació experimental del filtre en tres dimensions per comparar amb els resultats obtinguts a través de les simulacions realitzades amb Fluent. Per tant, el model per a filtres en tres dimensions és una proposta pendent de la seva validació.

## **7 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

Aquest estudi inclou els següents documents:

- 1- Memòria i annexos
- 2- Pressupost

## **8 BIBLIOGRAFIA**

JACK T, CORNELISSEN, FARIBORZ TAGHIPOUR, RENAUD ESCUDIÉ, NAKO ELLIS, JOHN R. GRACE. CFD modelling of a liquid-solid fluidized bed. 2007.

ANSYS, INC. Ansys Fluent theory guide. Canonsburg, PA. 2017(a)

ANSYS, INC. Ansys Fluent User guide. Canonsburg, PA. 2017(b)

# **ANNEX A**

## **GENERACIÓ DE LA MALLA**

### A.1. Mallat simulacions en dues dimensions

Per al mallat de les simulacions 2D s’ha optat per un mallat en forma de graella. Aquest tipus de mallat permet resultats més bons, a causa de la seva uniformitat. A continuació s’explicarà el procediment per realitzar el mallat utilitzat.

Per crear la malla en forma de graella, s’han assignat el nombre de divisions, tant en direcció longitudinal com en direcció transversal. En la figura 29 es pot observar en quines arestes de la geometria s’ha realitzat aquestes assignacions.

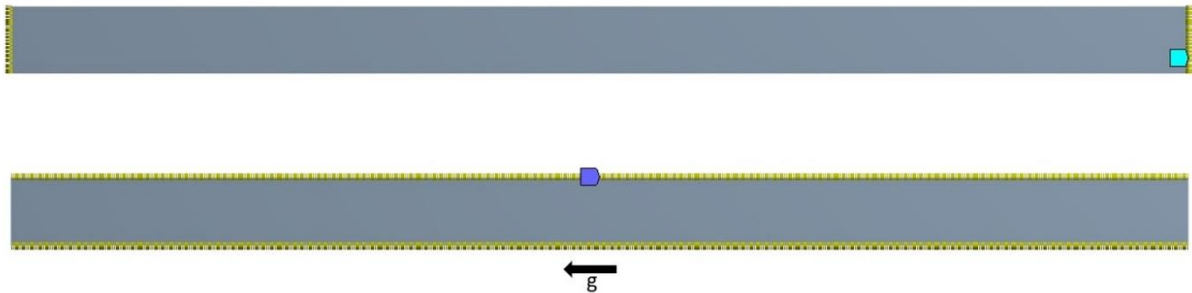


Figura 29 – Representació de les separacions longitudinals (superior) i separacions transversals (inferior).

En la configuració de les separacions, s’ha tingut en compte tres apartats, els quals es poden observar en la figura 30. En el punt 1, es pot veure el nombre de divisions. Aquest valor canvia en funció de la malla que s’ha utilitzat. En aquest cas, aquesta figura representa la configuració de la malla 60x550. En les divisions longitudinals, el valor és la meitat, 30 en comptes de 60, ja que la geometria representa un cos de revolució i, per tant, queda tallada per la meitat.

Divisions longitudinals		Divisions transversals	
<b>Scope</b>		<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Edges	Geometry	2 Edges
<b>Definition</b>		<b>Definition</b>	
Suppressed	No	Suppressed	No
Type	Number of Divisions	Type	Number of Divisions
① <input type="checkbox"/> Number of Divisions	30	① <input type="checkbox"/> Number of Divisions	550
<b>Advanced</b>		<b>Advanced</b>	
② Behavior	Hard	② Behavior	Hard
Capture Curvature	No	Capture Curvature	No
Capture Proximity	No	Capture Proximity	No
③ Bias Type	- - - - -	③ Bias Type	No Bias
Bias Option	Bias Factor		
<input type="checkbox"/> Bias Factor	10,		
Reverse Bias	1 Edge		

Figura 30 - Paràmetres de les separacions longitudinals (esquerra) i les transversals (dreta).

En el punt 2 es determina el comportament de les divisions. En utilitzar un comportament dur, els elements mantindran la seva estructura. En canvi, amb un comportament tou, els elements es deformen més ràpidament.

En el punt 3 es defineix el biaix. En aquest cas, només les divisions longitudinals tenen biaix, ja que s'ha volgut que els elements siguin més petits en la zona propera a la paret del filtre, per capturar millor la informació en aquella zona, que és on la variació de velocitat és més important. En el cas de les geometries de revolució, aquest biaix només s'aplica en un dels costats, tal com es pot observar en la figura 31. El factor del biaix indica la proporció de les separacions entre els dos extrems. El factor és de 10, per tant, l'element més petit és 10 vegades més petit que l'element més gran. En la figura 31, en la part superior es pot observar com els elements són petits i de forma progressiva es va augmentant la seva mida.

En el cas que la geometria sigui la secció del filtre, el biaix afecta els dos extrems d'aquesta, quedant els elements més grans en el centre.



Figura 31 - Biaix en la separació longitudinal.

Per últim, s'ha aplicat un mallat de superfície per mantenir les separacions constants. Els paràmetres d'aquesta operació es poden veure en la figura 32. El mallat superficial evita que en el centre de la geometria no es mantinguin les separacions desitjades. En aquest cas s'ha seleccionat un mallat que generi quadrilàters.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<b>Definition</b>	
Suppressed	Yes
Active	No, Suppressed
Mapped Mesh	Yes
Method	Quadrilaterals
Constrain Boundary	No
<b>Advanced</b>	
Specified Sides	No Selection
Specified Corners	No Selection
Specified Ends	No Selection

Figura 32 - Paràmetres del mallat superficial.

En la figura 33 es pot veure la diferència entre utilitzar o no el mallat superficial.

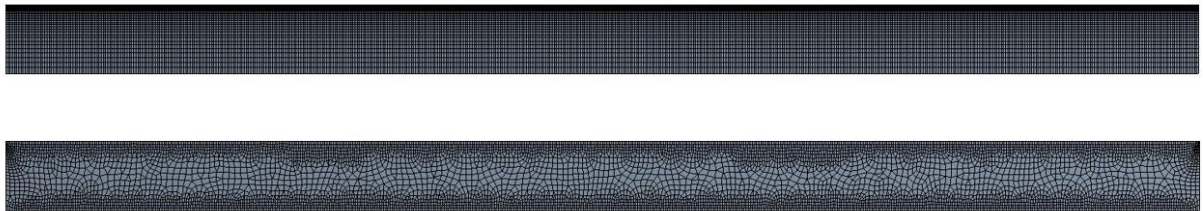


Figura 33 - Geometria amb mallat superficial (superior; millor) i sense mallat superficial (inferior; pitjor).

La malla resultant per a les geometries de revolució queda composta per 16500 elements i 17081 nodes. La malla per a la geometria que representa la secció del filtre serà el doble de gran.

## A.2. Malla simulacions en tres dimensions

Per a les simulacions del filtre en tres dimensions s'ha utilitzat dues malles diferents, ja que per a l'última simulació realitzada s'ha creat una malla amb més elements. Per això, en aquest capítol s'explica com s'han creat aquestes malles, quines operacions s'han realitzat i quins són els paràmetres de les dues. Es referirà com a malla normal, la malla utilitzada en la majoria de les simulacions, i com a malla gran, la malla utilitzada en l'últim cas amb un gran nombre d'elements. La malla normal consta de 1184968 elements i la malla gran consta de 3105198 elements.

Primer s'ha definit la forma dels elements que la componen. En aquest cas la malla està composta per tetraedres. S'ha assignat aquesta condició a tota la geometria. També s'ha definit la mida d'aquests elements, els quals s'han distingit per volums. A la taula 25 es pot observar els seus valors. En el cas de la malla gran, com que no es té en compte la part inferior, no s'ha realitzat aquesta operació. En la part inferior s'ha reduït la mida respecte als altres dos volums, com que la geometria és més irregular.

	Mida dels elements (mm)	
	Malla normal	Malla Gran
Part superior	5	5
Sorra	5	5
Part inferior	3	-

Taula 25 - Mida dels element (mm) dels diferents volums del filtre.

Un cop s'ha assignat la mida general dels elements en tot el cos, s'ha reduït la mida en zones concretes on s'ha cregut important, de cara a obtenir una major precisió en el càlcul. Una d'aquestes zones és l'entrada i la sortida del filtre, que es poden observar en la figura 34.

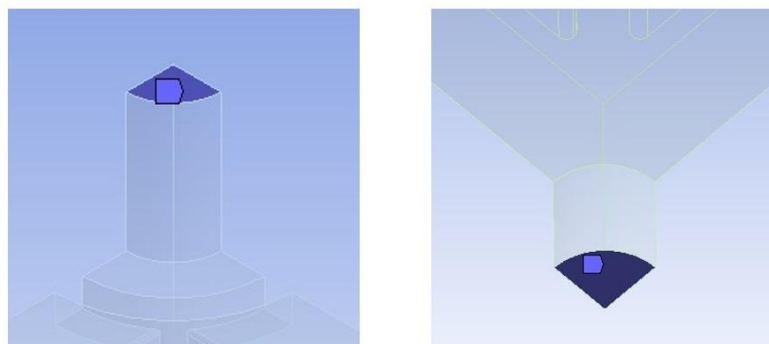


Figura 34 – Sortida (esquerra) i entrada (dreta) del filtre en el procés de contrarentat.



En el cas de la malla gran, l'entrada del filtre és diferent, ja que no compta amb la part inferior. Aquesta entrada es fa a través de la reixa, la qual es comentarà més endavant. La mida dels elements en aquestes superfícies es pot observar en la taula 26.

	Mida dels elements (mm)	
	Malla normal	Malla Gran
Sortida	0,5	0,5
Entrada	0,5	-

Taula 26 - Mida dels elements (mm) en l'entrada i la sortida del filtre.

Com a que és important capturar el comportament del fluid quan està en contacte amb una superfície, s'han modificat tots els elements de les cares que toquen la paret del filtre. L'operació realitzada es diu "Inflation". Aquesta operació fa que es generin unes capes de prismes triangulars al damunt de la superfície seleccionada. Això fa que els resultats en les zones properes a aquesta superfície siguin més acurats. Les cares a les quals s'ha realitzat aquesta modificació es mostren a la figura 35.

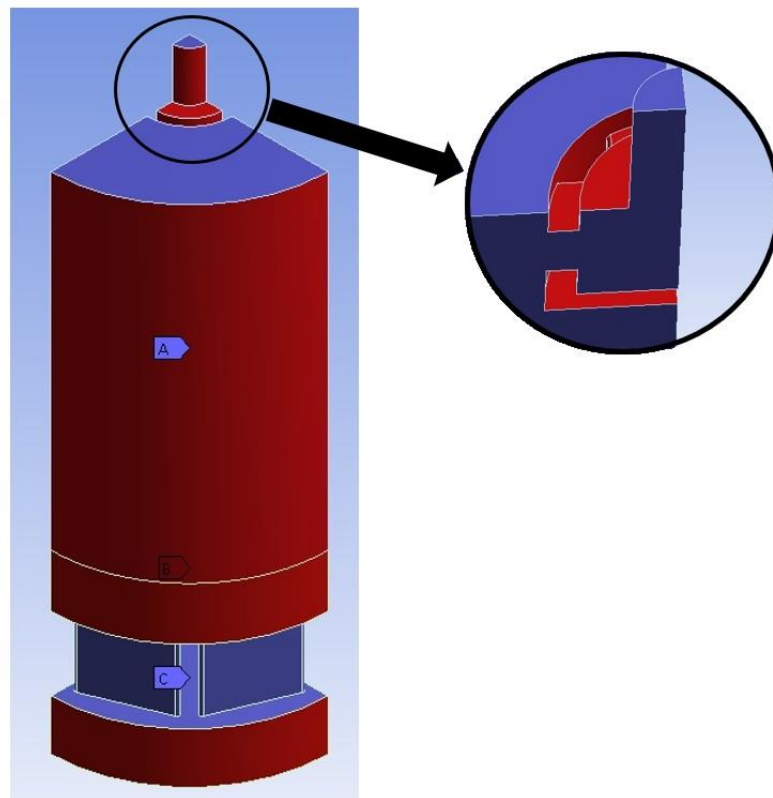


Figura 35 - Superfícies (en vermell) on s'ha aplicat la operació "inflation".

Aquesta malla de prismes s'ha decidit que sigui de 5 capes. El resultat d'aplicar aquesta operació es pot observar en la figura 36.

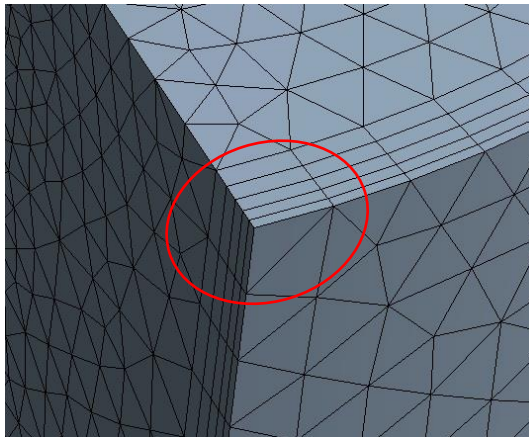


Figura 36 – Exemple de capes de prismes triangulars creades a l'aplicar l'operació "inflation".

Per a totes les superfícies, i les dues variants de malla, s'han aplicat les mateixes característiques. Els paràmetres utilitzats es poden veure en la figura 37. En vermell es poden observar els paràmetres més importants. En seleccionar una transició suau, ens permet ajustar tres paràmetres. Transition ratio defineix amb quina proporció es passa de la zona de capes al mallat normal. Com més gran sigui, més gran serà l'amplada de la zona de capes de prismes triangulars.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Multiple Entities
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	Default (0,272)
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Figura 37 - Paràmetres de l'operació "inflation".

Maximum layers defineix el nombre de capes de prismes que es desitja.

Growth rate defineix la relació de creixement de la primera capa de prismes, la més fina, a l'última capa de prismes, la més gruixuda.

La zona del difusor, que es troba en la part superior del filtre, té una geometria molt irregular. Per això s'ha volgut disminuir la mida dels elements en aquesta zona. En la figura 38 es pot veure la zona seleccionada on s'ha disminuït la mida dels elements. Aquesta reducció de mida només s'aplica als elements superficials, que s'han disminuït a 2 mm.

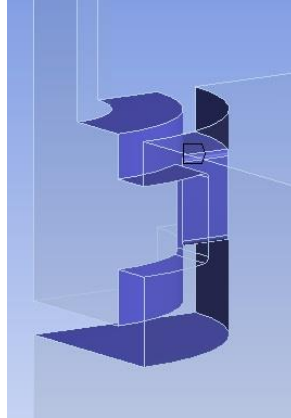


Figura 38 - Zona del difusor on s'ha modificat la mida dels elements.

En les zones properes a l'entrada i la sortida del fluid també s'ha reduït la mida. S'han creat dos cilindres, un en la part superior i un altre en la part inferior tal com es pot veure a la figura 39.

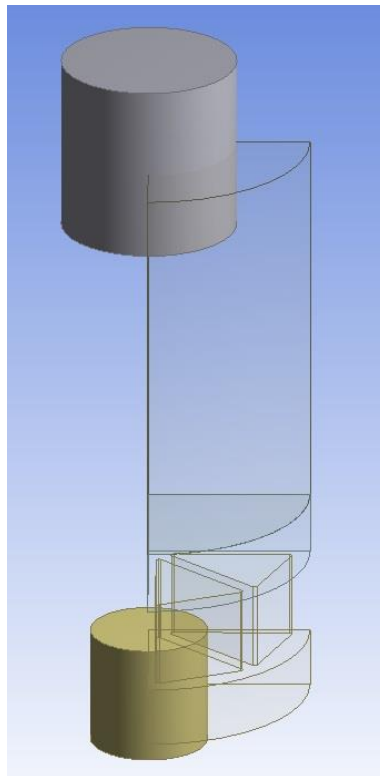


Figura 39 - Cilindres que intercepten amb la geometria del filtre.

Aquests dos cilindres s'utilitzen per delimitar la zona a la qual es vol reduir el mallat. En aquest cas, el volum del filtre que es troba dins dels dos cilindres s'ha reduït la mida a 1 mm. El cilindre superior té un radi de 30 mm i l'inferior de 20 mm. Es troben centrats respecte a l'eix del filtre. En el cas de la malla gran, només consta de la reducció de mida en la part superior, degut a que s'ha omès la part inferior.

En la figura 40 es pot veure l'efecte de la reducció del mallat. En les zones més properes a l'eix del filtre la mida del mallat és més petita que en les zones exteriors.

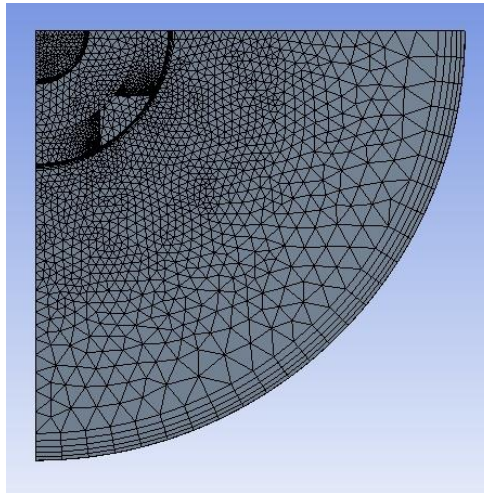


Figura 40 - Alçat de la malla del filtre.

L'última zona on s'ha reduït la mida dels elements del mallat és la zona de contacte entre la part inferior i la sorra, tal com es mostra en la figura 41.

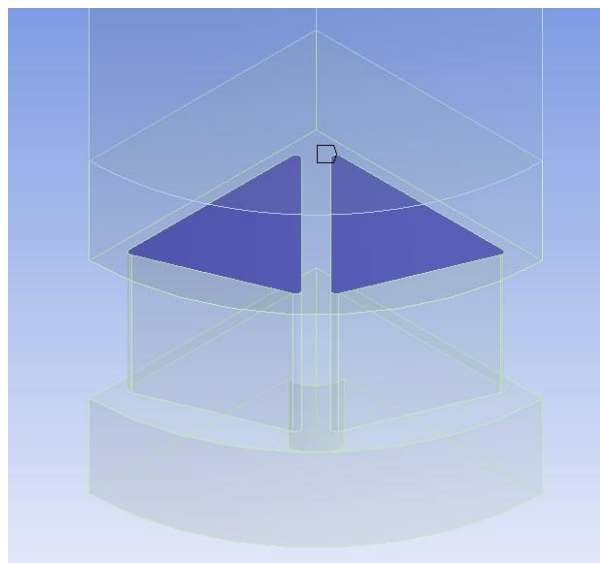


Figura 41 - Zona de contacte entre la part inferior i la sorra.

Per a la malla normal, la mida dels elements s'ha reduït a 1 mm. En el cas de la malla gran, com s'han incorporat els forats de la reixa, aquesta reducció s'ha dividit en dos. La primera en la zona exterior dels forats, el que representaria la reixa, com es mostra en la figura 42. En aquesta zona s'ha reduït la mida a 1 mm, com en la malla normal.

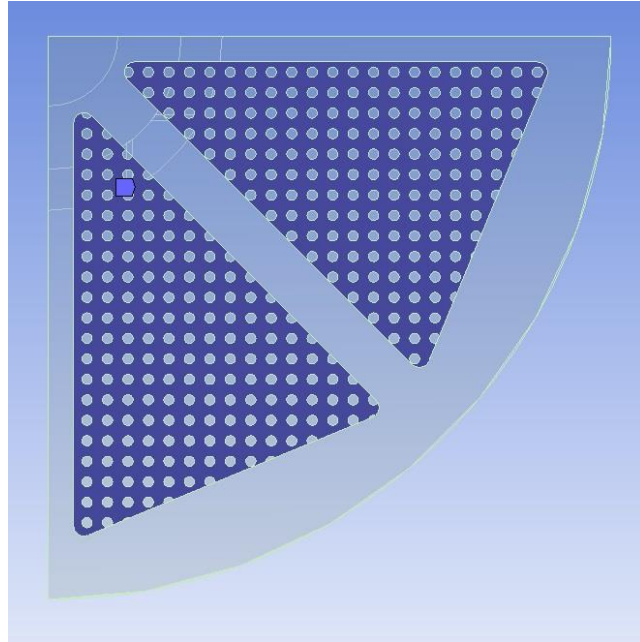


Figura 42 - Reducció de la mida dels elements en la reixa.

L'altra disminució s'ha realitzat en la zona interior dels forats, on la mida dels elements és de 0,2 mm. Aquesta zona es pot observar en la figura 43.

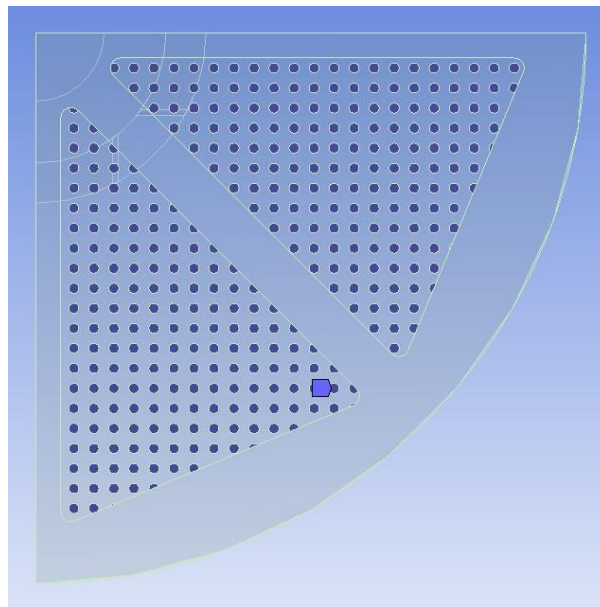


Figura 43 - Reducció de la mida dels elements a l'interior dels forats de la reixa.

### A.3. QUALITAT DE LA MALLA 3D

La malla ha de complir uns certs aspectes per poder dir que aquesta és bona i ens pot proporcionar resultats correctes.

El primer és el aspect ratio, que calcula la proporció dels triangles i dels tetraedres que formen la malla. En el cas 2D, ho fa de dues maneres diferents, dividint l'aresta més llarga del triangle amb la més curta i dividint la normal més llarga amb la més curta. A la figura 44 es pot veure definit el aspect ratio. Per considerar-se que és correcte, el valor màxim en tot el domini ha de ser inferior a 20.

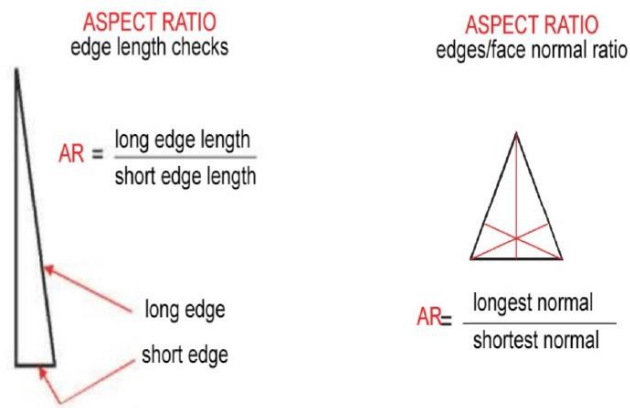


Figura 44 - Definició del aspect ratio.

Un altre aspecte a tenir en compte és el skewness. En 2D, aquest paràmetre fa una relació a partir de l'angle que formen les línies que van des d'un vèrtex del triangle al centre de l'aresta oposada. Aquest angle se li resta a 90° i després es divideix per 90°, per obtenir aquest factor. Com més s'acosti a un triangle equilàter, més petit serà aquest factor. Es pot veure un exemple del que s'ha explicat en la figura 45, a més d'una taula amb els valors que es consideren correctes. El valor màxim ha de ser inferior a 0,94 per poder-lo considerar correcte.

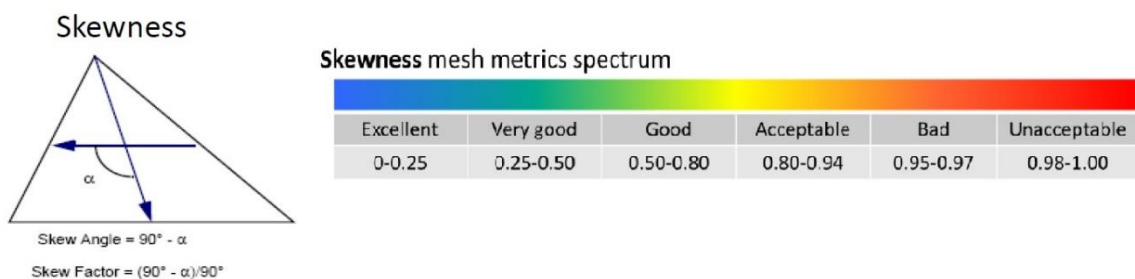


Figura 45 - Definició del Skewness i escala de valors.

L'últim aspecte referent a la malla que s'ha tingut en compte és el Orthogonal quality. Aquest es basa en la relació dels angles entre els vectors que van del centre del triangle al centre de les arestes respecte a els vectors normals a les arestes, tal com es pot veure en la figura 46. El valor mínim ha de ser superior a 0,15 per poder-lo considerar correcte.

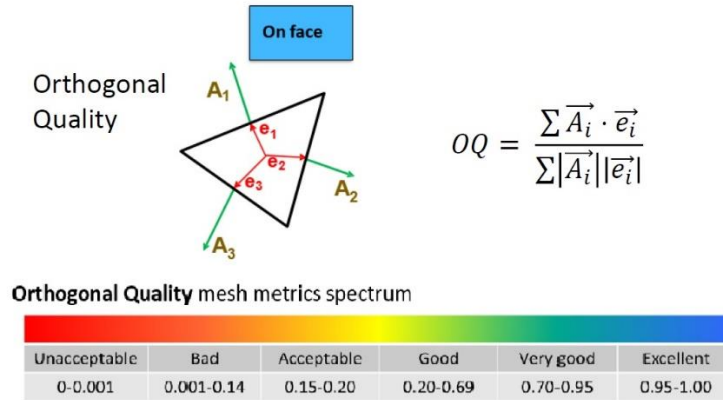


Figura 46 - Definició del Orthogonal quality i escala de valors.

Els valors obtinguts de les dues malles utilitzades es poden veure en la taula 27 a continuació.

	Nº elements	Aspect ratio (màxim)	Skewness (màxim)	Orth. Quality (mínim)
Malla normal	1184968	20,726	0,849	0,151
Malla gran	3105198	20,103	0,850	0,150

Taula 27 - Valors del Aspect ratio, Skewness i Orthogonal quality de la malla.

# **ANNEX B**

## **CONFIGURACIÓ DEL MODEL**



## B.1. INTRODUCCIÓ

En aquest annex es pot trobar la configuració dels models utilitzats en les simulacions realitzades amb ANSYS-Fluent, ja siguin les característiques dels materials que hi intervenen, com les equacions que regeixen el model. Com en aquest treball s'han estudiat diferents alternatives, en les descripcions dels models es poden veure les diferents opcions que s'han simulat.

## B.2. MODEL DUES DIMENSIONS (2D)

En aquest apartat es descriuen els paràmetres utilitzats en les simulacions en 2D. En els apartats on només aparegui una opció, aquesta és la que s'ha utilitzat per a totes les simulacions. En el cas que hi hagi dues o més, s'indica quina opció s'ha utilitzat com a referència i quina opció s'ha canviat específicament i en quina simulació.

La nomenclatura de les simulacions segueix un ordre numèric igual que a la memòria.

### FASE 1

Descripció	Cas general	Alternativa
Material:	Aigua	
Densitat:	999,5 kg/m <sup>3</sup>	
Viscositat:	0,001236 kg/m·s	

### FASE 2

Descripció	Cas general	Alternativa
Material:	Sorra	
Densitat:	2540 kg/m <sup>3</sup>	
Viscositat:	0,001003 kg/m·s	

Tipus de material:	Granular	
Granular temperature model:	Partial differential equation	Phase Property (REV60550WY_PP)

Propietats:		
Diàmetre	0,00113 m	
Granular viscosity:	syamlal-obrien	
Granular bulk viscosity:	lun-et-al	
Frictional viscosity:	Schaeffer	
Angle of internal friction:	30 (constant)	
Frictional pressure:	None	
Frictional modulus:	Derived	
Friction packing limit:	0,61 (constant)	
Granular conductivity*:	syamlal-obrien	

Granular Temperature**:	Algebraic
Solids pressure:	lun-et-al
Radial distribution:	syamlal-obrien
Elasticity modulus:	Derived
Packing limit:	0,65 (constant)

**Interacció entre fases**

Descripció	Cas general	Alternativa
Virtual mass:	None	
Drag:	wen-yu	Huilin-gidaspow (REV60550HG)
Lift:	None	
Collisions:	0,9 (constant)	
Mass:	0	
Surface tension:	None	
Interfacial area:	ia-symmetric	

**Propietats simulació**

Descripció	Cas general	Alternativa
Time step	0,001s	0,0001s (REV60550WY_0001)
Criteri de convergència	$10^{-3}$	$10^{-4}$ (REV60550WY_RE104)

\*: Granular conductivity s'utilitza quan s'ha definit el model de temperatura granular com a Partial Differential Equation.

\*\* : Granular Temperature s'utilitza quan s'ha definit el model de temperatura granular com a Phase Property

**B.3. MODEL TRES DIMENSIONS (3D)**

El model del filtre en tres dimensions és pràcticament idèntic al dels casos en dues dimensions. Els casos on s'ha variat la configuració, s'ha especificat quin valor correspon a cada simulació en la descripció a continuació.

**FASE 1**

Descripció	Cas general	Alternativa
Material:	Aigua	
Densitat:	999,5 kg/m <sup>3</sup>	
Viscositat:	0,001236 kg/m·s	

**FASE 2**

Descripció	Cas general	Alternativa
Material:	Sorra	
Densitat:	2540 kg/m <sup>3</sup>	
Viscositat:	0,001003 kg/m·s	
Tipus de material:	Granular	
Granular temperature model:	Partial differential equation (3DPDE_2V)	Phase Property (3DPP_3VLLARG) (3DPP_3V) (3DPP_3VU0) (3DPP_2VMG)
Propietats:		
Diàmetre	0,00113 m	
Granular viscosity:	syamlal-obrien	
Granular bulk viscosity:	lun-et-al	
Frictional viscosity:	Schaeffer	
Angle of internal friction:	30 (constant)	
Frictional pressure:	None	
Frictional modulus:	Derived	
Friction packing limit:	0,61 (constant)	
Granular conductivity*:	syamlal-obrien	
Granular Temperature**:	Algebraic	
Solids pressure:	lun-et-al	
Radial distribution:	syamlal-obrien	
Elasticity modulus:	derived	
Packing limit:	0,65 (constant)	

**Interacció entre fases**

Descripció	Cas general	Alternativa
Virtual mass:	none	
Drag:	wen-yu	
Lift:	none	
Collisions:	0,9 (constant)	
Mass:	0	
Surface tension:	none	
Interfacial area:	ia-symmetric	

**Propietats simulació**

Descripció	Cas general	Alternativa
Time step	0,001s (3DPP_3VLLARG) (3DPP_3V) (3DPP_2VMG)	0,0001s (3DPDE_2V) (3DPP_3VU0)
Criteri de convergència	10 <sup>-4</sup>	

\*: Granular conductivity s'utilitza quan s'ha definit el model de temperatura granular com a Partial Differential Equation.

\*\* : Granular Temperature s'utilitza quan s'ha definit el model de temperatura granular com a Phase Property

## B.4. EQUACIONS DEL MODEL

En aquest apartat de l'annex es mostraran les equacions utilitzades pels diferents models que tracten la interacció amb la sorra. Les equacions pròpies de la dinàmica de fluids no s'exposen perquè es poden trobar en bibliografia estàndard. Aquestes equacions que tracten de la interacció del líquid amb la sorra s'han extret de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

### B.4.1. Granular Viscosity

El mètode de resoldre el comportament de la sorra es suposa que es comporta com un líquid amb unes propietats determinades. La viscositat granular segueix la fórmula expressada en l'equació 3. Aquesta es compon per tres aspectes: la viscositat de col·lisió, la viscositat cinètica i la viscositat de fricció.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (\text{Eq.3})$$

L'equació 4 mostra la viscositat de col·lisió.

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\Theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \alpha_s \quad (\text{Eq.4})$$

On  $\alpha_s$  és la fracció en volum de la fase sòlida,  $\rho_s$  és la densitat física de la fase sòlida,  $d_s$  és el diàmetre de la fase sòlida,  $g_{0,ss}$  és la funció de distribució radial de la fase sòlida,  $e_{ss}$  és el coeficient de restitució de col·lisions de partícules de la fase sòlida i  $\Theta_s$  és la temperatura granular de la fase sòlida.

L'equació 5 mostra la viscositat cinètica. En aquest apartat l'ANSYS-Fluent permet escollir diferents equacions. En aquest cas s'ha utilitzat la de Syamlal-Obrien, la qual és l'opció per defecte.

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[ 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right] \quad (\text{Eq.5})$$

L'equació 6 mostra la viscositat de fricció, expressió de Schaefer.

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \varphi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (\text{Eq.6})$$

On  $p_s$  és la pressió del sòlid,  $\varphi$  és l'angle de fricció interna i  $I_{2D}$  és el segon invariant de tensor d'esforços.

Per a més detall, es pot consultar l'apartat 17.4.8.Granular Properties i 17.5.13.4.Frictional Viscosity de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

#### B.4.2. Granular Bulk Viscosity

Aquest terme de viscositat per a la fase sorra segueix el model de Lun et al, representat en l'equació 7.

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq.7})$$

Per més detall, es pot trobar a l'apartat 17.5.13.3.Bulk Viscosity de l'ANSYS-Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

#### B.4.3. Granular Temperature

La simulació de la sorra com un fluid utilitza el concepte de temperatura granular com una mesura de l'energia cinètica de les partícules en el seu moviment aleatori. S'ha escollit que la temperatura granular segueixi un model algebraic, l'opció per defecte quan s'utilitza el model de temperatura granular Phase Property. Aquest es representa per l'equació 8.

$$0 = \left( -p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s - \gamma_{\theta_s} + \varphi_{ls} \quad (\text{Eq.8})$$

On  $\left( -p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s$  és la generació d'energia pel tensor d'esforços de la fase sòlida.

On  $\gamma_{\theta_m}$ , està representat en l'equació 9:

$$\gamma_{\theta_m} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (\text{Eq.9})$$

On  $\varphi_{ls}$ , està representat en l'equació 10 i és l'intercanvi d'energia entre la fase  $l^{\text{th}}$  de fluid o sòlid amb la  $s^{\text{th}}$  fase sòlida:

$$\varphi_{ls} = -3K_{ls}\theta_s \quad (\text{Eq.10})$$

On  $K_{ls}$  és el coeficient d'intercanvi entre la fase líquida i la sòlida.

Per a més detall, es pot consultar l'apartat 17.4.9.Granular Temperature de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

#### B.4.4. Solids Pressure

La pressió dels sòlids es regeix per l'equació 11.

$$P_{s,total} = \sum_{q=1}^N p_q \quad (\text{Eq.11})$$

On  $p_q$ , representat en l'equació 12:

$$p_q = \alpha_q \rho_q \Theta_q + \sum_{p=1}^N 2 \frac{d_{pq}^3}{d_q^3} (1 + e_{pq}) g_{0,pq} \alpha_q \alpha_p \rho_q \Theta_q \quad (\text{Eq.12})$$

On  $\alpha_q$  és la fracció en volum de la fase  $q$ ,  $\rho_q$  és la densitat física de la fase  $q$ ,  $d_{pq}$  és el diàmetre mig de les fases  $p$  i  $q$ ,  $d_q$  és el diàmetre de la fase  $q$ ,  $g_{0,pq}$  és la funció de distribució radial de les fases  $p$  i  $q$ ,  $e_{pq}$  és el coeficient de restitució de col·lisions de partícules de les fases  $p$  i  $q$  i  $\Theta_q$  és la temperatura granular de la fase  $q$ .

Per a més detall, es pot consultar l'apartat 17.4.10.Solid Pressure de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

#### B.4.5. Radial Distribution

La distribució radial és una funció que modifica la probabilitat de col·lisions entre grans quan la fase granular és densa. Segueix l'equació 13, equació empírica utilitzada per a simulacions amb  $n$  fases.

$$g_{0,ll} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_l \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k}{d_k} \quad (\text{Eq.13})$$

On  $\alpha_{s,max}$  és el límit de compactació de la fase sòlida,  $d_l$  és el diàmetre de la fase líquida,  $N$  és el nombre de fases sòlides,  $\alpha_k$  és la fracció en volum de les fases sòlides i  $d_k$  és el diàmetre de les fases sòlides.

Per a més detall, es pot consultar l'apartat 17.5.11.1.Radial Distribution Function de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).

#### B.4.6. Drag

En aquest treball s'han utilitzat dos models d'arrossegament de la fase sorra diferents.

El model Wen-Yu és aplicable als fluxos de fase diluïda, en què la fracció de volum de fase secundària (sorra) total és significativament inferior a la de la fase primària (aigua). Aquest model s'expressa amb l'equació 14.

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_l^{2.65} \quad (\text{Eq.14})$$

On  $\alpha_l$  és la fracció en volum de la fase líquida,  $\rho_l$  és la densitat física de la fase líquida,  $v_s$  és la velocitat de la fase sòlida i  $v_l$  és la velocitat de la fase líquida.

On el coeficient de fricció  $C_D$  està representat en l'equació 15:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0.15 (\alpha_l Re_s)^{0.687}] \quad (\text{Eq.15})$$

On el nombre de Reynolds de la fase sorra  $Re_s$ , està representat en l'equació 16:

$$Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l} \quad (\text{Eq.16})$$

On  $\mu_l$  és la viscositat del fluid. Totes les altre variables o paràmetres han estat definits prèviament.

El model Gidaspow es recomana per a llits densos i fluïditzats. El model de Huilin-Gidaspow proporciona una millor funció de mescla per al model Gidaspow quan es passa d'un límit de compactació dens al límit de flux diluït.

El model de Huilin-Gidaspow és una combinació entre el model de Wen-Yu i l'equació d'Ergun, que hauria de ser el límit de  $K_s$  per sorres compactades.

Aquest model s'expressa amb l'equació 17.

$$K_{sl} = \psi K_{sl-Ergun} + (1 - \psi) K_{sl-Wen\&Yu} \quad (\text{Eq.17})$$

On  $\psi$ , és representat en l'equació 18:

$$\psi = \frac{1}{2} + \frac{\arctan(262.5(\alpha_s - 0.2))}{\pi} \quad (\text{Eq.18})$$



Per a més detall, es pot consultar l'apartat 17.5.6.2.Fluid-Solid Exchange Coefficient de la Ansys Fluent Theory Guide (ANSYS INC, 2017a).